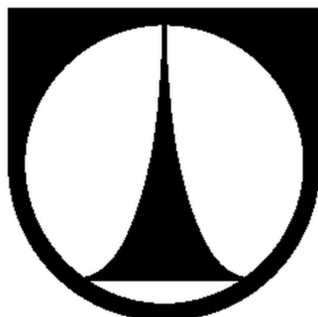


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů



ZAPALOVACÍ SVÍČKA S INTEGROVANOU KOMŮRKOU

SPARK PLUG WITH INTEGRATED COMBUSTION CHAMBER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Lukáš Mikulanin

Leden 2014

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů



Obor

Konstrukce strojů a zařízení

Zaměření

Pístové spalovací motory

ZAPALOVACÍ SVÍČKA S INTEGROVANOU KOMŮRKOU

SPARK PLUG WITH INTEGRATED COMBUSTION CHAMBER

Diplomová práce

KVM – DP – 661

Bc. Lukáš Mikulanin

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Stanislav Beroun CSc. – TU v Liberci, KVM

Konzultant diplomové práce: Ing. Aleš Ditrich – TU v Liberci, KVM

Počet stran: 64

Počet obrázků: 46

Počet příloh: 0

Počet výkresů: 3

Leden 2014

Místo pro vložení originálního zadání DP

Zapalovací svíčka s integrovanou komůrkou

Anotace

Diplomová práce popisuje v úvodní části mechanismus vzniku zážehu směsi ve spalovacím motoru, konstrukci a dílčí komponenty klasické zapalovací svíčky. Na tuto část navazuje popis technologií zlepšujících kvalitu zážehu, od 2 zapalovacích svíček na jeden válec, přes varianty komůrkového zážehu až po speciální svíčku s integrovanou komůrkou KVM. V další části je popsáno experimentální ověření teplot na pouzdře klasické zapalovací svíčky. V další části je zjednodušeně popsán výpočet přestupu tepla do jednotlivých komponentů (hlava válců, pouzdro svíčky...) a modelování teplotního pole zapalovací svíčky. V závěrečné části jsou ukázány možné konstrukční úpravy nejspodnější partie zapalovací svíčky.

Klíčová slova: zapalovací, komůrková, svíčka, komůrkový, zážeh, teplotní pole, přestup

Spark plug with integrated combustion chamber

Annotation

In the first part this work describes the mechanism of spark ignition engine, procedure of mixture ignition, construction and parts of classic spark plug. Following part continues in description of technologies which can improve the quality of mixture ignition from twin spark technology, through flame-jet ignition engines, to special spark plug with integrated combustion chamber. Next part describes the measurement of temperatures on the bottom of spark plug body. Next part describes simplified calculating of heat transfer into components (cylinder head, spark plug body...) and creating thermal analysis of spark plug. Last part this work shows possible variations of modified spark plug body.

Key words: spark, plug, flame, jet, ignition, body, engine, heat, transfer, convection

Desetinné třídění: (př. 621.43.01 - Teorie spalovacích motorů)

Zpracovatel: TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra vozidel a motorů

Dokončeno: 2014

Archivní označení zprávy:

Prohlášení k využívání výsledků diplomové práce

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom(a) povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V dne

.....

podpis

Poděkování

Velmi rád bych na tomto místě velmi poděkoval vedoucímu diplomové práce, váženému prof. Ing. Stanislavu Berounovi CSc. za cenné rady, vstřícnost, připomínky a metodické vedení diplomové práce. Další poděkování konzultantovi Ing. Aleši Ditrichovi za pomoc při měření teplot na zapalovací svíčke.

Dále bych chtěl poděkovat mé rodině a přátelům za důležitou podporu, kterou mi poskytovali během studia.

Obsah

Obsah.....	7
Seznam symbolů a jednotek	8
Seznam obrázků	10
Seznam tabulek	11
Seznam příloh.....	11
1 Úvod	12
2 Problematika zážehového motoru s vnější tvorbou směsi	13
3 Iniclace hoření směsi	14
4 Zapalovací svíčka	18
4.1 Elektrody.....	19
4.2 Pouzdro svíčky	21
4.3 Odporový zátav	21
4.4 Izolátor.....	22
5. Mezicyklová variabilita	25
6 Technická opatření na zvýšení kvality zážehu	27
6.1 Větší počet zapalovacích svíček	27
6.2 Komůrkový zážeh	28
6.3 Zapalovací svíčka s integrovanou komůrkou	31
7 Měření teplot pouzdra klasické zapalovací svíčky	34
7.1 Měření teplot pouzdra komůrkové zapalovací svíčky.....	38
8 Modelování teplotního pole na klasické zapalovací svíče	39
8.1 Výpočet přestupu tepla	39
8.2 Okrajové podmínky pro výpočtový model	50
9 Výsledné hodnoty tepelné simulace	55
10 Úprava pouzdra komůrkové svíčky	57
10.1 Úprava 1	57
10.2 Úprava 2	58
11 Výsledné hodnoty tepelné simulace úprav.....	59
12 Závěr	61
Použité zdroje.....	63

Seznam symbolů a jednotek

c_s	střední pístová rychlost	$[m \cdot s^{-1}]$
n	otáčky motoru	$[min^{-1}]$
p_{NVi}	tlak náplně ve válci	$[MPa]$
$\overline{p_{pi}}$	střední hodnota středního indikovaného tlaku	$[kPa]$
$\overline{p_{max}}$	střední hodnota maximálního spalovacího tlaku	$[kPa]$
Q_{HL}	teplo přestoupené do hlavy válců	$[J]$
Q_{KL}	teplo přestoupené do pouzdra klasické svíčky	$[J]$
Q_{KOM}	teplo přestoupené do pouzdra komůrkové svíčky	$[J]$
Q_{KLIZ}	teplo přestoupené do izolátoru klasické ZP	$[J]$
$Q_{KLSTŘ}$	teplo přestoupené do střední elektrody klasické ZP	$[J]$
Q_{KLVED}	teplo přestoupené do vedlejší elektrody klasické ZP	$[J]$
Q_{KOMDNO}	teplo přestoupené do dna komůrky	$[J]$
$Q_{KOMSTŘ}$	teplo přestoupené do střední elektrody komůrkové ZP	$[J]$
\dot{Q}_{HL}	tepelný tok do hlavy válců	$[W]$
\dot{Q}_{KL}	tepelný tok do pouzdra klasické svíčky	$[W]$
\dot{Q}_{KOM}	tepelný tok do pouzdra komůrkové svíčky	$[W]$
\dot{Q}_{KLIZ}	tepelný tok do izolátoru klasické ZP	$[W]$
$\dot{Q}_{KLSTŘ}$	tepelný tok do střední elektrody klasické ZP	$[W]$
\dot{Q}_{KLVED}	tepelný tok do vedlejší elektrody klasické ZP	$[W]$
\dot{Q}_{KOMDNO}	tepelný tok do dna komůrky	$[W]$
$\dot{Q}_{KOMSTŘ}$	tepelný tok do střední elektrody komůrkové ZP	$[W]$
r_{krit}	kritický poloměr kulového objemu ohniska zážehu	$[m]$
S_{HL}	plocha stěny hlavy v místě přestupu tepla	$[m^2]$
S_{KL}	plocha pouzdra klasické svíčky	$[m^2]$
S_{KLIZ}	plocha izolátoru klasické ZP	$[m^2]$
$S_{KLSTŘ}$	plocha střední elektrody klasické ZP	$[m^2]$
S_{KLVED}	plocha vedlejší elektrody klasické ZP	$[m^2]$
S_{KOM}	plocha pouzdra komůrkové svíčky	$[m^2]$

$S_{KOM_{DNO}}$	plocha dna komůrkové ZP	[m ²]
$S_{KOM_{STŘ}}$	plocha střední elektrody komůrkové ZP	[m ²]
$T_{Hstř}$	střední teplota stěny hlavy válců	[K]
$T_{HOstř}$	odhadnutá střední teplota stěny hlavy válců	[K]
T_{KLIZ}	odhadnutá střední teplota izolátoru klasické ZP	[K]
$T_{KL_{STŘ}}$	odhadnutá střední teplota střední elektrody klasické ZP	[K]
$T_{KL_{VED}}$	odhadnutá střední teplota vedlejší elektrody klasické ZP	[K]
$T_{KLstř}$	odhadnutá střední teplota stěny pouzdra klasické svíčky	[K]
T_{KOM}	odhadnutá střední teplota pouzdra komůrkové svíčky	[K]
$T_{KOM_{DNO}}$	odhadnutá střední teplota dna komůrkové ZP	[K]
$T_{KOM_{STŘ}}$	odhadnutá střední teplota střední elektrody komůrkové ZP	[K]
T_{NVi}	teplota náplně ve válci	[K]
T_4	teplota chladícího media	[K]
$VARp_i$	variabilita středního indikovaného tlaku	[%]
$VARp_{max}$	variabilita maximálního spalovacího tlaku	[%]
z	zdvih motoru	[m]
α_i	součinitel přestupu tepla	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
α_4	součinitel přestupu tepla pro chladící médium	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
δ_H	tloušťka hlavy motoru v místě prostupu tepla	[m]
δ_{pl}	šířka zóny plamene	[m]
$\Delta\tau_i$	časový interval, za který se KH otočí o 1°	[s]
$\Delta\tau_o$	časový interval, za který se KH otočí o 720°	[s]
λ_H	součinitel tepelné vodivosti pro materiál hlavy válců	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
$\overline{\sigma_{p_i}}$	směrodatná odchylka středního indikovaného tlaku	[kPa]
$\overline{\sigma_{p_{max}}}$	směrodatná odchylka maximálního spalovacího tlaku	[kPa]

Seznam obrázků

Obr. 1 - Schéma rozložení teplotního pole jiskřiště v průběhu rozvoje ohniska zážehu [1]....	15
Obr. 2 - Schématický nákres molekulární a turbulentní difuze [2]	16
Obr. 3 - Vliv předstihu zážehu na průběh tlaku ve válci [3]	17
Obr. 4 - Konstrukce zapalovací svíčky [12]	19
Obr. 5 - Vliv uspořádání elektrod zapalovací svíčky na dráhu jiskry [3].....	20
Obr. 6 - Vliv odporového zátavu na elektromagnetické rušení přístrojů [17]	22
Obr. 7 - Vliv teploty špičky izolátoru na provozní vlastnosti [13]	23
Obr. 8 - Vliv tepelné hodnoty svíčky na přenos tepla [14].....	24
Obr. 9 - Mezicyklová variabilita zážehového motoru v $p - \alpha$ diagramu [6]	25
Obr. 10 - Komůrkový zážeh – jednoduchý [7]	29
Obr. 11 - Komůrkový zážeh - vrstvené plnění směsi [7].....	29
Obr. 12 - Komůrkový zážeh - Honda CVCC [16].....	30
Obr. 13 - Vliv rozměrů komůrky na rychlost výlehu plamene [7].....	30
Obr. 14 - Zapalovací svíčka s integrovanou komůrkou [4]	31
Obr. 15 - Vizualizace postupu hoření [4].....	32
Obr. 16 - Průběh hodnot tlaků p_i a p_{max} pro zážeh klasickou svíčkou [4].....	32
Obr. 17 - Průběh hodnot tlaků p_i a p_{max} pro zážeh svíčkou s integrovanou komůrkou [4].....	32
Obr. 18 - Současné provedení zapalovací svíčky s integrovanou komůrkou	33
Obr. 19 - Umístění mikrotermočlánků v pouzdře klasické zapalovací svíčky [9]	34
Obr. 20 - Fotografie měřící svíčky použité pro opakované měření.....	35
Obr. 21 - Fotografie připraveného měření.....	35
Obr. 22 - Naměřená vnější otáčková charakteristika motoru.....	36
Obr. 23 - Polohování měřících míst na pouzdře zapalovací svíčky 18. 11. 2013	36
Obr. 24 - Polohování měřících míst na pouzdře svíčky (opakované měření) 12. 12. 2013	36
Obr. 25 - Teploty pouzdra zapalovací svíčky v závislosti na otáčkách motoru	37
Obr. 26 - Umístění mikrotermočlánků v pouzdře komůrkové zapalovací svíčky [9]	38
Obr. 27 - Schéma pro výpočtový odhad střední teploty stěny[8].....	39
Obr. 28 - Průběh teploty a tlaku náplně ve válci během pracovního cyklu	45
Obr. 29 - Součinitel přestupu tepla podle Eichelberga v průběhu pracovního cyklu	48
Obr. 30 - Porovnání hodnot součinitele přestupu tepla ve válci motoru [8].....	48

Obr. 31 - Přestup tepla do hlavy válců v průběhu pracovního cyklu	49
Obr. 32 - Přestup tepla do pouzdra svíčky v průběhu pracovního cyklu podle Eichelberga ...	49
Obr. 33 - Model klasické a komůrkové zapalovací svíčky	50
Obr. 34 - Popis ploch pro určení okrajových podmínek.....	52
Obr. 35 - Síť prvků na výpočtovém modelu	54
Obr. 36 - Tepelná analýza modelu s pouzdem klasické svíčky při 5000 min ⁻¹	55
Obr. 37 - Tepelná analýza modelu s pouzdem klasické svíčky – detail při 5000 min ⁻¹	55
Obr. 38 - Tepelná analýza modelu s pouzdem komůrkové svíčky při 5000 min ⁻¹	56
Obr. 39 - Tepelná analýza modelu s pouzdem komůrkové svíčky - detail 5000 min ⁻¹	56
Obr. 40 - Komůrková svíčka – úprava 1.....	57
Obr. 41 - Spalovací prostor Honda CVCC [18]	58
Obr. 42 - Komůrková svíčka - úprava 2	58
Obr. 43 - Tepelná analýza modelu komůrkové svíčky - úprava 1 při 5000 min ⁻¹	59
Obr. 44 - Tepelná analýza modelu komůrkové svíčky – úprava 1 - detail 5000 min ⁻¹	59
Obr. 45 - Tepelná analýza modelu komůrkové svíčky - úprava 2 při 5000 min ⁻¹	60
Obr. 46 - Tepelná analýza modelu komůrkové svíčky – úprava 2 - detail 5000 min ⁻¹	60

Seznam tabulek

Tab. 1 - Zadané hodnoty pro výpočet tepelných toků	46
Tab. 2 - Výsledné hodnoty výpočtu tepelných toků.....	47
Tab. 3 - Fyzikální vlastnosti použitých materiálů ve výpočtovém modelu.....	51

Seznam příloh

Výkres pouzdra komůrkové svíčky	KVM-DP-661-1
Výkres pouzdra komůrkové svíčky úprava 1	KVM-DP-661-2
Výkres pouzdra komůrkové svíčky úprava 1	KVM-DP-661-3

1 Úvod

Zážehový spalovací motor dosáhnul po více než 140 letech nepřetržitého technického vývoje značných úspěchů a kvalit. Při jeho provozu však dochází ke spalování uhlovodíkových paliv (ropných produktů) a vzniku škodlivých výfukových emisí: oxid uhelnatý (CO), oxid uhličitý (CO₂), oxidy dusíku (NO_x), nespálené uhlovodíky (HC) a pevné částice (PM). Vlády vyspělých zemí proto kladou na výrobce automobilů legislativní tlak, tyto emisní limity snižovat, např. Evropská unie emisní předpisem Euro 6, vstupujícím v platnost v září 2014. Z toho důvodu se výrobci automobilů zaměřují na vývoj nových agregátů a jejich technická vylepšení s cílem: zvýšit účinnost motoru, resp. snížit spotřebu paliva a produkci škodlivých emisí.

Tato diplomová práce se bude zabývat technologií tzv. komůrkového (nepřímého) zážehu směsi (tzv. Flame-jet ignition) pomocí speciálně vytvořené zapalovací svíčky s integrovanou komůrkou, mající vliv na zkvalitnění zážehu směsi v motoru, resp. zvýšení jeho účinnosti.

V rešeršní části diplomové práce je popsán princip zážehu směsi ve spalovacím motoru, konstrukce klasické zapalovací svíčky, její teplotní namáhání ale také nevýhody plynoucí z její konstrukce, ke kterým patří zejména mezicyklová variabilita spalovacího procesu. Na tuto část přímo navazuje popis jednotlivých technických opatření, zvyšujících kvalitu zážehu směsi: použití více zapalovacích svíček na válec a technologie komůrkového zážehu.

V hlavní části se diplomová práce věnuje zapalovací svíčce s integrovanou komůrkou, její konstrukci, praktickým zkušenostem získaných při jejím testování, nevýhodami, ale zejména výpočtu tepelného namáhání pouzdra klasické, resp. komůrkové zapalovací svíčky a jeho následné simulaci pomocí tepelné analýzy v MKP software PRO/Mechanica.

V diplomové práci je rovněž popsáno experimentální ověření teplot v nejspodnější části pouzdra klasické zapalovací svíčky. Získané hodnoty byly použity ke korekci výpočtového modelu.

2 Problematika zážehového motoru s vnější tvorbou směsi

V současné době je stále u převážné části vozidlových zážehových spalovacích motorů použito nepřímého vstřikování paliva (do sacího potrubí, sacího kanálu popřípadě oblasti sacího ventilu). Směs vzduchu a lehce odpařitelných kapalných nebo plyných paliv je tedy připravována mimo spalovací prostor motoru. Takto vytvořená směs se musí během plnění válce a části kompresního zdvihu pístu zcela homogenizovat, tj. musí dojít k úplnému odpaření paliva a palivové páry se musí téměř dokonale smísit se vzduchem. V této fázi je pro správné tvoření směsi důležitá odpařitelnost paliva, resp. jeho schopnost tvořit se vzduchem zápalnou směs. Odpařitelnost paliva se posuzuje pomocí destilační křivky, udávající závislost odpařeného množství paliva na teplotě.

Na vytvoření kvalitní směsi má zásadní vliv konstrukce, řízení, uspořádání a funkčnost palivového systému motoru. Ta musí vždy zaručit správnou bohatost směsi, v rozsahu mezi zápalností pro dané palivo, a to ve všech pracovních režimech motoru, dle tzv. datové mapy v elektronické řídicí jednotce motoru. Ať se jedná již o prohřátý motor, nebo studený motor, kde se palivo odpaří jenom zčásti, protože nedochází k ohřátí směsi od stěn sacího potrubí a pracovního prostoru, důsledkem čehož se směs ve válci jeví jako chudá. Proto je motor při studeném startu provozován na bohatou směs, dokud nedojde ke správnému prohřátí. Vstřikovací systémy pro zážehové motory využívají vstřikovací tlaky cca 0,1 – 0,5 MPa, kdy se při vstřikování do sacího potrubí vytváří tzv. „palivová mlha“ s kapkami paliva menšími než 100 μm .

Další faktor významně ovlivňující kvalitu homogenizace směsi je způsob rozvíření čerstvé náplně přiváděné do pracovního prostoru. Vhodnou konstrukcí spalovacího prostoru, polohy sacího kanálu a ventilu je možno zajistit vytvoření buď příčného „tumble“ víru, tangenciálního „swirl“ víru nebo radiálního „squish“ rozvíření. V současné době se u zážehových motorů ve stále větším množství využívá různého tvarování plochy čela pístu.

Při kompresi směsi vzduchu a paliva dochází k jejímu zahřátí na teplotu cca 500 °C (dle provozních podmínek), která je ovšem nižší než teplota samovznícení. Odolnost paliva proti samovznícení je dána jeho oktanovým číslem u paliv kapalných resp. metanovým číslem u paliv plyných. Vzhledem k výše uvedeným faktům, musí dojít k iniciaci hoření homogenní

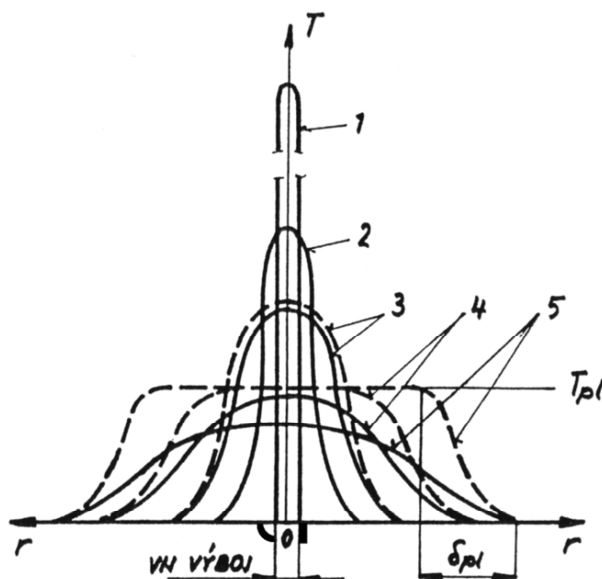
směsi v zážehovém spalovacím motoru pomocí vysokonapětového výboje vznikajícího mezi elektrodami zapalovací svíčky.

3 Iniciace hoření směsi

Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, k iniciaci hoření dochází pomocí vysokonapětového výboje. Vysokonapětový výboj vzniká mezi střední a vnější elektrodou zapalovací svíčky. Důsledkem toho dojde, ve velmi omezeném objemu směsi, k extrémně rychlému navýšení teploty mezi elektrodami zapalovací svíčky až na hodnotu překračující 10^4 °C. Současně dochází ve velmi malém okolí jiskřiště k tepelné disociaci molekul, intenzivní ionizaci a rozvoji předoxidačních reakcí (při kterých vznikají tzv. aktivované částice), které v konečné fázi vyústí až ke vzniku životaschopného ohniska zážehu. Následně se z takto vytvořeného ohniska zážehu začne hoření rozšiřovat do nespálené směsi vlivem přestupu tepla.

Pro spolehlivé zapálení stechiometrické homogenní směsi u benzinových motorů se udává jako velikost zapalovací energie 3 – 5 mJ, přiváděná po dostatečně dlouho dobu, přibližně 0.5 – 1 ms. Nicméně zapalovací svíčky běžně disponují zapalovací energií 10mJ. Pro zajištění spolehlivého zážehu chudých až velmi chudých směsí je zapotřebí výrazně zvýšit zapalovací energii svíčky až k hodnotám 30 – 120 mJ a zároveň také prodloužit dobu, po kterou je energie přiváděna až na 2 ms.

Mechanismus zážehu sestává z několika fází. Jednotlivé fáze lze popsat rozložením teplotního pole v blízkosti jiskřiště svíčky (viz obr. 1).



Obr. 1 - Schéma rozložení teplotního pole jiskřiště v průběhu rozvoje ohniska zážehu [1]

1. fáze – charakterizována křivkou 1. Jedná se o velice prudký nárůst teploty mezi elektrodami zapalovací svíčky v okamžiku vysokonapětového výboje
2. fáze – charakterizována křivkami 2 a 3. Díky vedení tepla se z ohniska výboje začne rozšiřovat do jeho okolí oblast zvýšené teploty, přičemž teplota v ohnisku výboje klesá.
3. fáze – charakterizována čárkovanými křivkami 4 a 5. Hoření se dále rozšiřuje do okolí ohniska zážehu za předpokladů, že teplota směsi neklesne pod teplotu zapálení T_{pl} a zároveň poloměr hoření r_{krit} překročí kritickou hodnotu. Protože je odvod tepla kompenzován uvolněným teplem při oxidaci, dojde ke zpomalení poklesu teploty.

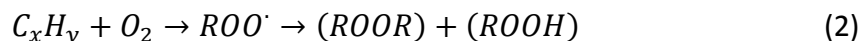
Jako kritickou podmínku pro zážeh proto můžeme uvažovat poloměr kulového objemu ohniska zážehu r_{ohn} , který musí být při poklesu teploty alespoň 3x větší než šířka zóny plamene δ_{pl} . Tady podmínka je definována přibližným vztahem:

$$r_{krit} = 3 \cdot \delta_{pl} \quad (1)$$

Fáze kdy teplota klesne pod teplotu zapálení T_{pl} a nedojde ke vzniku životaschopného ohniska zážehu, je charakterizována křivkami 4 a 5.

Pro tvorbu životaschopného ohniska zážehu jsou rovněž nedílnou součástí probíhající chemické procesy. Mechanismus zážehu lze popsat jako nastartování předoxidačních reakcí pomocí vysokonapětového výboje. Následně dojde vlivem vysoké teploty k přeměně molekul

uhlovodíkového paliva, které přišly do kontaktu s molekulami kyslíku na radikály s peroxidovou vazbou (-O-O-) a dále na peroxidy (ROOR) a hydroperoxidy (ROOH). Tento proces lze popsat pomocí schéma:

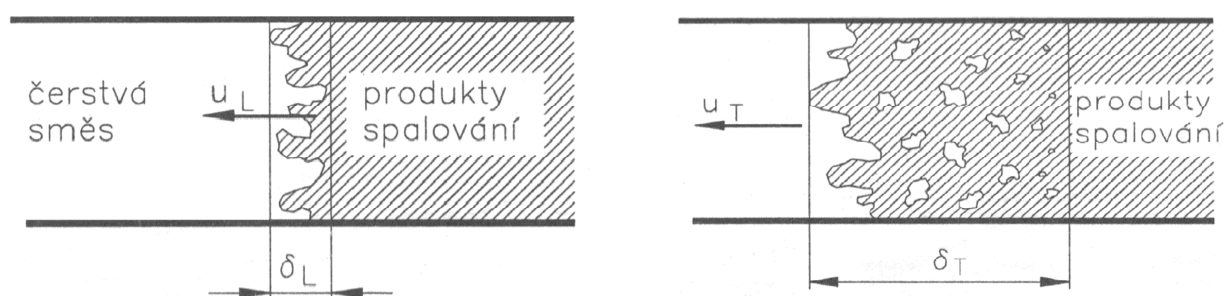


Protože jsou vzniklé peroxidy a hydroperoxidy velmi nestabilní, začnou se rychle rozpadat a dojde ke vzniku energeticky velmi bohatých aktivovaných částic, tzv. volných radikálů, které mají za následek pokračování dalších řetězových reakcí spjatých s uvolňováním tepla. Tento proces lze popsat pomocí schéma:



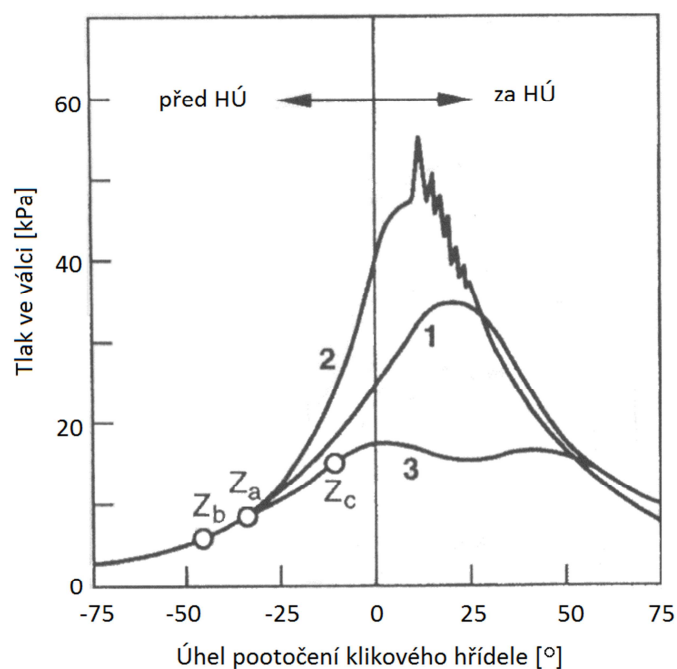
Otevřený plamen vznikne až ve chvíli, kdy dojde k dosažení určité koncentrace produktů předoxidačních reakcí, tedy volných radikálů. Doba, po kterou dochází k tvorbě vytváření potřebné koncentrace volných radikálů, se označuje jako indukční doba nebo také průtah zážehu resp. vznícení pro naftové motory.

Postupem čela plamene se hoření rozšiřuje z ohniska zážehu dále do okolí. Rychlost, jakou čelo plamene postupuje, závisí především na počtu aktivovaných částic pronikajících ze zóny hoření do nespálené směsi. V klidném prostředí pronikají aktivované části do nespálené směsi působením molekulární difuze, při které je hloubka zóny plamene δ_L a rychlost postupu plamene u_L ($u_L \leq 1$ m/s) relativně malá. Ve válci motoru se však na rychlosti postupu plamene podílí turbulentní difuze, při které nedochází k pronikání jednotlivých molekul do nespálené směsi jako u molekulární difuze, nýbrž k pronikání celých elementárních objemů. Díky turbulentní difuzi se zvýší hloubka zóny hoření δ_T ($\delta_T \approx 10$ mm) a zároveň vzroste o 2 – 3 řády rychlost postupu čela plamene u_T ($\approx 20 - 40$ m/s).



Obr. 2 - Schématický náčrt molekulární a turbulentní difuze [2]

Pro správné zažehnutí směsi je důležitý okamžik jejího zapálení, tzn. předstih zážehu. Jeho velikost závisí zejména na otáčkách a zatížení motoru, dále na oktanovém čísle paliva, kompresním poměru ale i teplotě směsi. Na (obr. 3) ukazuje křivka 1 průběh tlaku při správném zážehu v okamžiku Z_a . Křivka 2 ukazuje velký předstih zážehu, zapalující v bodě Z_b , kdy v motoru dojde k detonačnímu spalování (tzv. klepání). Křivka 3 ukazuje příliš malý předstih, zapalující v bodě Z_c . V současnosti je u vozidlových motorů předstih zážehu řízen elektronicky a jeho velikost je udržována na hranici přijatelné intenzity klepání, při které pracuje zážehový motor s nejvyšší možnou účinností.



Obr. 3 - Vliv předstihu zážehu na průběh tlaku ve válci [3]

4 Zapalovací svíčka

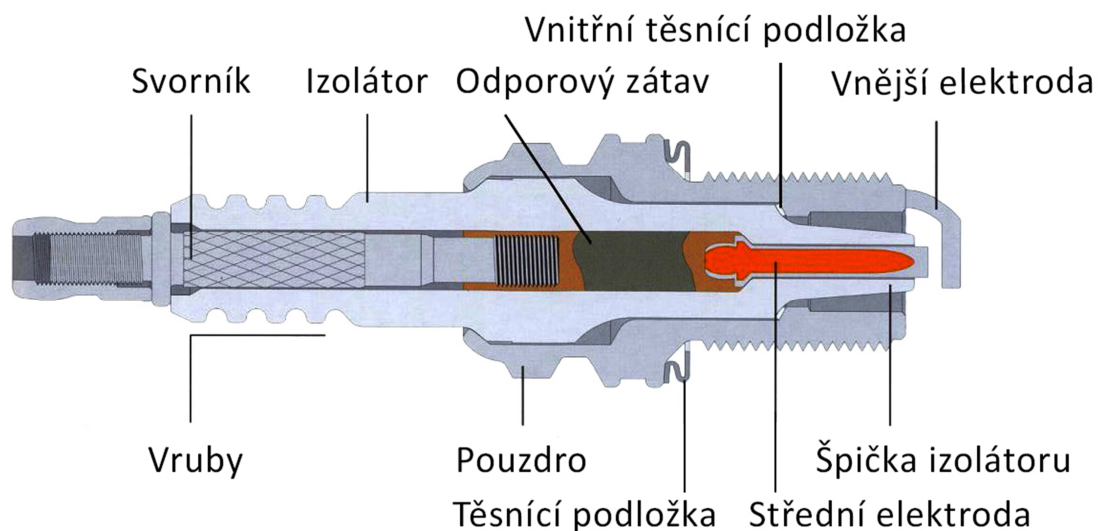
Zapalovací svíčka je zařízení umístěné v hlavě válců motoru, které slouží k vytvoření vysokonapěťového výboje nutnému ke vzniku ohniska zážehu. Zapalovací svíčka musí bezpečně zapalovat při všech provozních režimech spalovacího motoru, během kterých je vystavena působení poměrně velkého počtu potencionálně nepříznivých jevů, kterým musí spolehlivě odolávat.

Jedním z řady požadavků na zapalovací svíčku je, že musí odolávat cyklickému teplotnímu i tlakovému namáhání, kdy teplota spalování může dosáhnout hodnoty až 2500 °C a tlak až 6 MPa. Vzniklé tlakové pulzace musí být svíčka schopna bezpečně utěsnit. Naopak při sání čerstvé směsi vzniká ve válci podtlak a teplota může klesnout až na 60 °C. Dalším nepříznivým jevem působícím na svíčku, jsou napěťové rázy, které mohou dosahovat hodnot až 40 kV při okamžitých teplotách nejspodnější partie izolátoru a střední elektrody až 900 °C. Zároveň musí být dostatečně odizolována kladná a záporná elektroda, aby nedocházelo ke zkratům, probíjení popřípadě svodům elektrické energie. Svíčka musí rovněž dostatečně odvádět teplo z elektrod vyčnívajících do spalovacího prostoru. V neposlední řadě musí svíčka odolávat chemickým vlivům v agresivním prostředí spalovacího prostoru.

Zapalovací svíčka proto musí zkonstruována tak, aby odolávala:

- vysokým tlakům až 10 MPa
- cyklickému teplotnímu namáhání
- napěťovým rázům až 40 kV
- mechanickému namáhání a vibracím
- chemickým vlivům spalovacího prostoru
- úsadám vzniklých z hoření paliva (i mazacího oleje)
- erozi při vysokých teplotách
- atmosférické vlhkosti

Konstrukce zapalovací svíčky je zobrazena na (obr. 4).



Obr. 4 - Konstrukce zapalovací svíčky [12]

4.1 Elektrody

4.1.1 Střední elektroda

Funkcí střední elektrody je přivádět vysoké napětí od zapalovací cívky. Střední elektroda je u klasických zapalovacích svíček upevněna v izolátoru a je spojena se svorníkem přivádějícím vysoké napětí, pomocí polovodivého křemíkového zátavu, zajišťujícím dobrou těsnost spojení. Její průměr je o něco málo menší, než je otvor v nejspodnější části izolátoru.

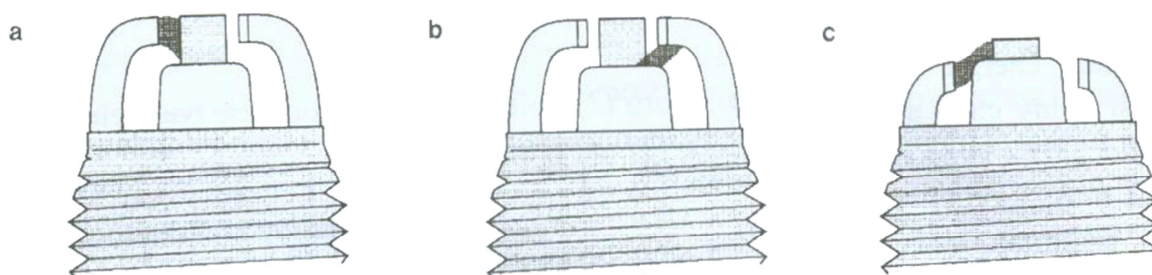
Běžná provozní teplota nejspodnější partie střední elektrody se pohybuje v rozmezí 500 – 700 °C. Vzhledem k tepelnému namáhání, kterému je vystavena, se pro střední elektrodu používají vysoce kvalitní materiály odolné proti korozi, např. slitiny wolframu, železa a chromu, niklu nebo iridia, které ovšem potřebují relativně vysoké přeskokové napětí. Pro vysoce kvalitní zapalovací svíčky s dlouhou dobou životnosti (až 70 000 km) se jako materiál středních elektrod využívá stříbro popřípadě slitina platiny.

Střední elektroda zapalovací svíčky je vyráběna speciální tvářecí technologií, díky které je uvnitř střední elektrody vytvořeno jádro s vysokou tepelnou vodivostí, nejčastěji z mědi, které zajišťuje kvalitní odvod tepla z jejího konce do izolátoru a dále do pouzdra svíčky.

4.1.2 Vnější elektroda

Vnější elektroda je spojena s pouzdem zapalovací svíčky, zpravidla má hranatý průřez a spolu se střední elektrodou tvoří jiskřiště. Jako materiál vnějších elektrod se nejčastěji využívají slitiny niklu, dobře odolávající vysokým teplotám. V současnosti se využívá různých provedení jiskřiště, lišících se počtem vnějších elektrod (1 až 4), jejich průřezem a konstrukcí, zvyšujících životnost svíčky. Vnější elektroda proto může střední elektrodu přesahovat (stříšková elektroda), nebo může být bočně vyveden větší počet elektrod. Zvláštní konstrukcí je svíčka bez vnější elektrody, označovaná jako svíčka s klouzavou jiskrou. U tohoto provedení vzniká výboj mezi střední elektrodou a speciálně upravenou plochou na nejspodnější část pouzdra.

Konstrukce a geometrie tvaru elektrod má proto vliv na odvod tepla ze svíčky, její opotřebení a velikost potřebného přiváděného zapalovacího napětí.



Obr. 5 - Vliv uspořádání elektrod zapalovací svíčky na dráhu jiskry [3]

Provedení se vzdušným jiskřištěm (viz obr. 5a), kde je jiskra vedena plynem od střední elektrody. Provedení (viz obr. 5b) ukazuje vzdušné i klouzavé jiskřiště, kde je jiskra vedena od střední elektrody povrchem izolátoru a plynem. Provedení (viz obr. 5a) ukazuje klouzavé jiskřiště, vedení je obdobné jako u provedení b.

Další důležitým parametrem zapalovací svíčky je vzájemná vzdálenost elektrod, která je obvykle 0.7 až 1.2 mm. Pokud je vzdálenost mezi elektrodami příliš velká, je vyžadováno vysoké zapalovací napětí, což vede k vynechávání při vyšších otáčkách motoru. Naopak pokud je vzdálenost elektrod příliš malá, vzniká relativně malá jiskra s nízkou energií, která zhoršuje zapálení směsi, což má za následek vynechávání jiskry, hlučný volnoběh motoru a zhoršené hodnoty výfukových emisí.

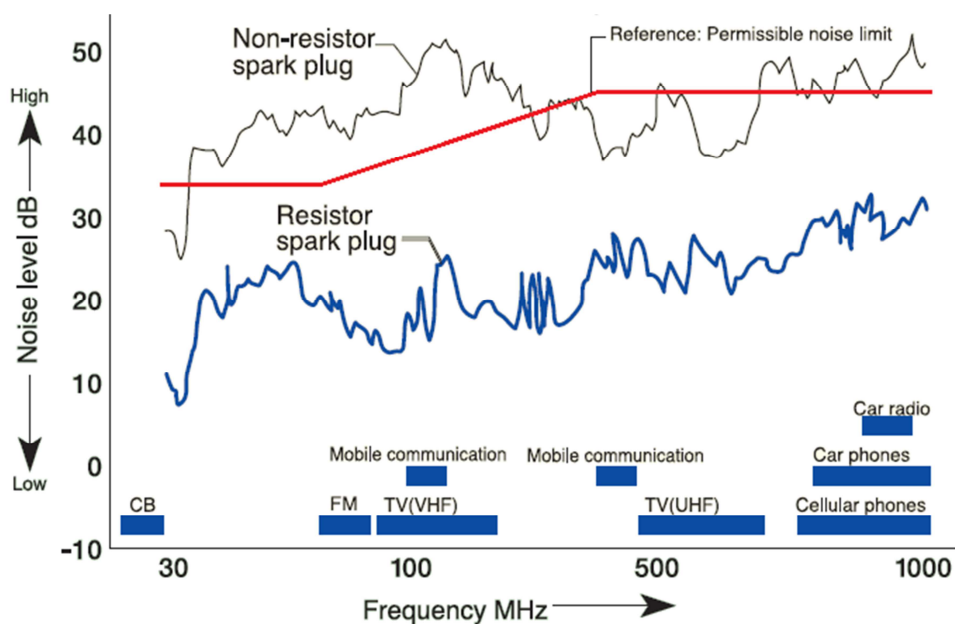
4.2 Pouzdro svíčky

Pouzdro zapalovací svíčky tvoří od středu až do nejspodnější části jakýsi její obal, ve kterém je umístěn izolátor se střední elektrodou. V horní části pouzdra je šestihran, sloužící pro montáž svíčky a ve spodní části pouzdra je vytvořen závit, nejčastěji používaný M14 x 1.25, pro zašroubování do hlavy válců. U moderních motorů se 4 ventilovou hlavou válců se začínají používat zapalovací svíčky se závitem M12 x 1.25. V nejspodnější části je k pouzdru přivařena vnější elektroda. Jako materiál pouzdra svíčky se nejčastěji používá ocel třídy 11 s galvanicky nanesenou tenkou vrstvou niklu, pro zajištění protikoroze ochrany. Pro zajištění dobré tepelné vodivosti a těsnosti tlaků spalovacího prostoru se používají těsnící podložky. Vnější těsnící podložka těsní vzájemný kontakt pouzdro svíčky – hlava válců a vnitřní těsnící podložka (zpravidla měděná) zajišťuje těsnost skupiny pouzdro svíčky – izolátor (viz obr. 4).

Pro dobrý odvod tepla ze svíčky do hlavy válců je její pouzdro tou nejzásadnější částí. V závislosti na konstrukci a tepelné hodnotě svíčky je zhruba 80 % a více tepla odváděno právě dosedací – těsnící a závitovou plochou pouzdra. Je však třeba pamatovat na to, že toto teplo je do pouzdra svíčky přivedeno také ze střední elektrody, izolátoru a vnější elektrody.

4.3 Odporový zátav

Odporový zátav slouží ke spojení střední elektrody a svorníku uvnitř izolátoru zapalovací svíčky. Nejčastěji je vyroben z křemíku pro jeho polovodičové vlastnosti. Odporový zátav slouží v především ke snížení elektromagnetického rušení, vznikajícího při provozu spalovacího motoru, které má nepříznivý vliv na funkčnost elektronické řídicí jednotky motoru, palubních přístrojů nebo mobilních telefonů. Nejčastěji používaná hodnota odporu je 3 – 5 kΩ. Závodní automobily, motocykly popř. terénní čtyřkolky a další dopravní prostředky nepodléhající elektromagnetickému rušení, používají zapalovací svíčky bez odporového zátavu, protože taková svíčka vytváří silnější jiskru. Porovnání velikosti rušení obou provedení zapalovacích svíček ukazuje obrázek 6.

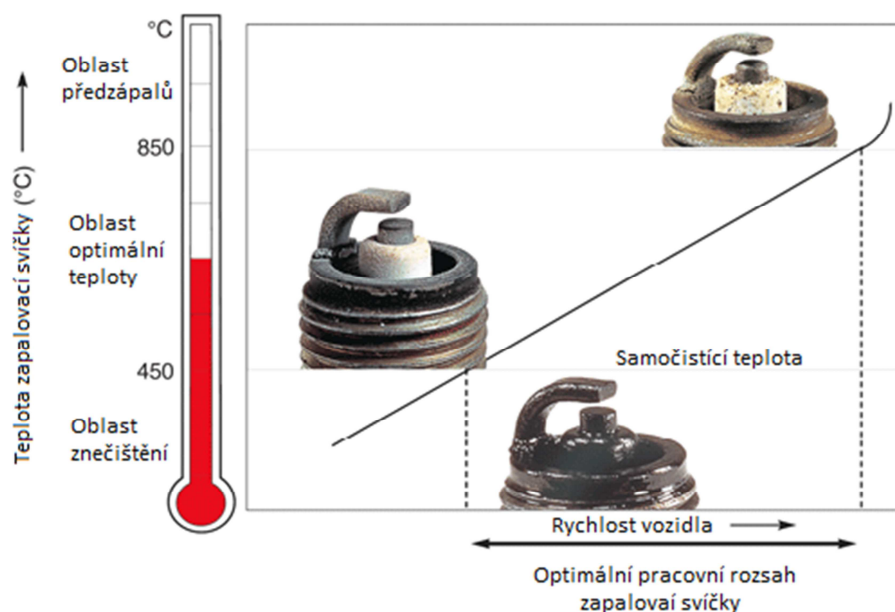


Obr. 6 - Vliv odporového zátavu na elektromagnetické rušení přístrojů [17]

4.4 Izolátor

Izolátor, jako jedna ze základních částí zapalovací svíčky, má na její správnou funkci zásadní vliv, protože zprostředkovává dostatečnou izolační vrstvu mezi střední elektrodou a pouzdrem svíčky, resp. vnější elektrodou. Pro správnou funkčnost jsou proto na izolátor kladeny specifické požadavky. Materiál izolátoru se musí v první řadě vyznačovat velmi dobrou izolační vlastností, vysokou pevností a odolností vůči vysokým tlakům a teplotám, které v nejspodnější části mohou dosáhnout teplot přes 900 °C. Materiál izolátoru musí mít rovněž dobrou odolnost proti chemickým účinkům a produktům hoření, které se na jeho nejspodnější části mohou usazovat. V současnosti se jako materiál, splňující všechny požadavky, používá velmi čistý korund (oxid hlinitý Al_2O_3) spolu s různými přísadami.

Je velice žádoucí, aby provozní teplota nejspodnější partie izolátoru svíčky byla v rozmezí 450 – 850 °C. V mezích tohoto rozmezí můžeme mluvit o samočisticí schopnosti svíčky, resp. samočisticí teplotě. Je to teplota, při které shoří usazeniny (karbon, mazací olej a palivo) vzniklé na špičce izolátoru, které by jinak mohly nepříznivě ovlivnit zapalovací vlastnosti svíčky. Naopak, pokud by teplota špičky izolátoru byla vyšší než 850 °C, začalo by docházet k samozápalům směsi, způsobujících pokles výkonu a přehřívání motoru.



Obr. 7 - Vliv teploty špičky izolátoru na provozní vlastnosti [13]

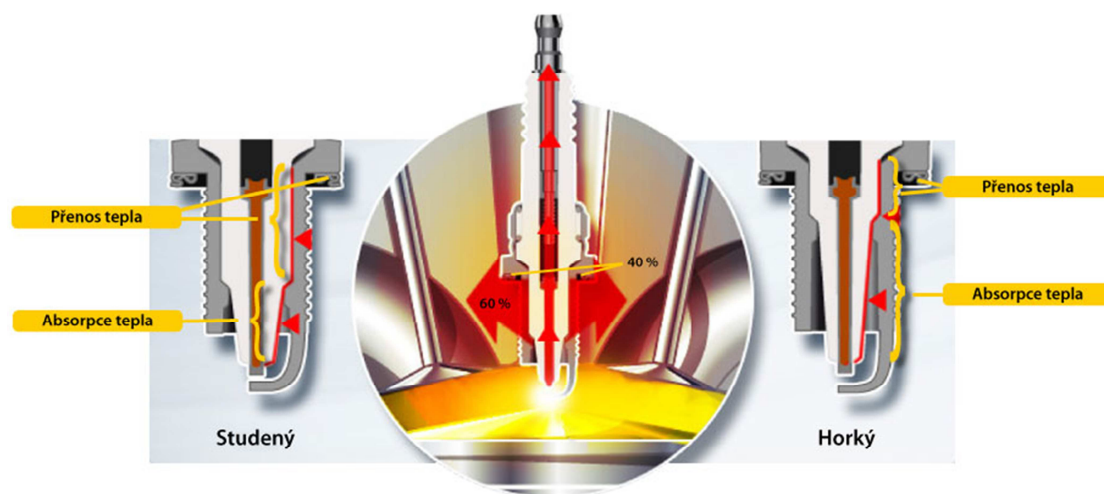
4.4.1 Tepelná hodnota svíčky

Protože různé motory produkují během svého provozu různě velké množství tepla, nemůže být pro všechny použita jedna univerzální zapalovací svíčka. Podle geometrie tvaru a zejména velikosti povrchu spodní části izolátoru proto určujeme tzv. tepelnou hodnotu zapalovací svíčky, která je měřítkem její tepelné zatížitelnosti.

Tepelná hodnota svíčky jako 3 ciferné číslo je čas v setinách minuty, za který se zapalovací svíčka za přesně stanovených podmínek na zkušebním motoru po studeném startu zahřeje do stavu, kdy dojde k samozápalům. Vysoké číslo značí studenou zapalovací svíčku. Tepelná hodnota svíčky se někdy uvádí (1-2) ciferným číslem, které vyjadřuje doporučení podle hodnoty středního indikovaného tlaku pracovního oběhu motoru.

Pro dlouhé špičky izolátoru, disponujícími velkou plochou, platí, že dokážou přijmout velké množství tepla v krátké době. Takové zapalovací svíčky se po studeném startu motoru ohřívají relativně rychle, mají nízkou tepelnou hodnotu a označují se jako „teplé“. Na druhé straně krátká špička izolátoru s malou plochou, přijímá malé množství tepla, které je rychle odváděno pouzdem zapalovací svíčky. Taková svíčka se méně zahřívá, má velkou tepelnou hodnotu a označuje se jako „studená“. Zapalovací svíčky s vysokou tepelnou hodnotou tj.

„studené“ jsou určeny především pro zážehové motory s vysokým tepelným zatížením a vysokým kompresním poměrem.



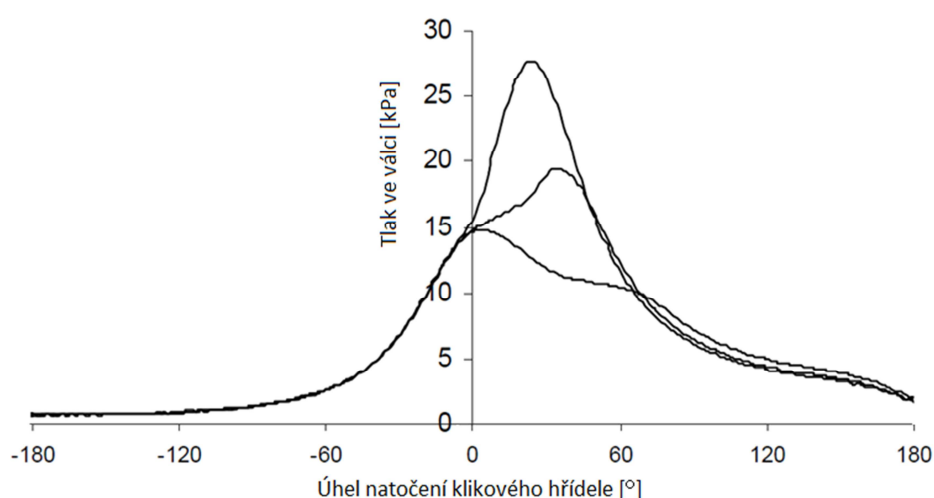
Obr. 8 - Vliv tepelné hodnoty svíčky na přenos tepla [14]

Při použití zapalovací svíčky o nízké tepelné hodnotě dochází k jejímu přehřívání (850 – 950 °C) a to má za následek samovznícení směsi tzv. samozápaly a detonační hoření. Naopak při použití svíčky o vysoké tepelné hodnotě nemusí být dosaženo samočisticí teploty a dochází ke vzniku usazenin z produktů spalování paliva, popř. oleje, na elektrodách svíčky: v důsledku toho dochází ke zhoršení kvality zážehu.

Tepelná hodnota svíčky je pouze přibližný porovnávací, svíčky se stejnou tepelnou hodnotou od různých výrobců se mohou svými vlastnostmi více či méně odlišovat.

5. Mezicyklová variabilita

Z výše uvedeného textu vyplývá, že správný zážeh homogenní směsi a následný spalovací proces je ovlivňován celou řadou více či méně nepříznivých faktorů. Tato skutečnost ve výsledku způsobuje velkou proměnlivost jednotlivých pracovních cyklů u zážehového motoru, kdy každý další cyklus má odlišný průběh tlaku než předchozí. Tento jev je označován jako mezicyklová variabilita. Hlavní příčinou variability pracovních cyklů v zážehovém motoru je iniciace hoření pouze v jediném místě objemu připravené směsi ve válci.



Obr. 9 - Mezicyklová variabilita zážehového motoru v $p - \alpha$ diagramu [6]

Velikost mezicyklové variability je možné určit z poměru směrodatné odchylky středního indikovaného tlaku $\overline{\sigma_{p_i}}$ a střední hodnoty středního indikovaného tlaku $\overline{p_i}$ v souboru po sobě následujících pracovních cyklech motoru v ustáleném provozním režimu.

$$VAR_{p_i} = \frac{\overline{\sigma_{p_i}}}{\overline{p_i}} \quad (4)$$

Spolu s mezicyklovou variabilitou středního indikovaného tlaku lze z poměru směrodatné odchylky spalovacího tlaku $\overline{\sigma_{p_{max}}}$ a střední hodnoty spalovacího tlaku $\overline{p_{max}}$ určit variabilitu maximálního (tzv. spalovacího) tlaku ve válci $VAR_{p_{max}}$. U současných vozidlových zážehových motorů spalujících homogenní směs je, u 150 po sobě následujících cyklech, velikost variability $VAR_{p_i} \sim 1 \div 2 \%$ a $VAR_{p_{max}} \approx 8 \%$. V režimech nízkého zatížení a

zejména při volnoběhu motoru jsou velikosti variabilit poměrně vysoké $VARp_i$ i $VARp_{max} > 8 - 9 \%$. U zážehových motorů je zejména v počátku hoření (do spálení 5 % paliva ve směsi) relativně velká mezicyklová variabilita, která významně ovlivňuje i následný průběh hoření.

Pomocí termodynamické analýzy indikátorových diagramů zážehových motorů, ať se již jedná o benzínové pracující se stechiometrickou směsí nebo plynové pracující s velmi chudou směsí, lze určit i poměrně velkou variabilitu maximální teploty náplně válce a doby hoření, jejíž hodnota se pro vyhoření 5 % - 95 % paliva ve směsi může pohybovat v rozmezí 35° - 80° KH.

Na mezicyklovou variabilitu má zásadní vliv skutečnost, že k rozvoji ohniska zážehu dochází pomocí vysokonapěťového výboje ve velmi malé oblasti mezi elektrodami zapalovací svíčky, přičemž na rozvoj hoření významně působí i určitá proměnlivost podmínek ve válci. Jedním z dalších nepříznivých faktorů je turbulence ve válci motoru, resp. v těsném okolí ohniska zážehu, způsobující rozptylování aktivovaných částic do širšího okolí a tak následné zpomalení procesu zážehu. Dalšími negativními faktory jsou např. spaliny ve válci z předchozího cyklu ovlivňující složení směsi v okolí ohniska zážehu, nehomogenita směsi nebo proměnlivost energie vysokonapěťového výboje zapalovací svíčky.

Pozitivní vliv na zlepšení a zkvalitnění zážehu směsi má zvýšení energie vysokonapěťového zážehu (u benzínových motorů na 10 mJ), popřípadě použití velmi kvalitních svíček se speciální konstrukcí jiskřiště. Nicméně se stále jedná pouze o jedno ohnisko zážehu. Pro další technický vývoj a zvyšování účinnosti vozidlového zážehového motoru s vnější tvorbou směsi je snížení jeho mezicyklové variability klíčové.

6 Technická opatření na zvýšení kvality zážehu

V současné době se u velké části moderních vozidlových zážehových spalovacích motorů používá přímého vstřikování paliva do válce motoru. Předností těchto motorů je optimálně vytvořený spalovací prostor pomocí hlavy válců a tvaru dna pístu s využitím vybrání, popř. deflektorů pro usměrnění proudění, popřípadě sací kanál opatřený speciální klapkou, umožňující tvoření vrstvené směsi. Výhodou vrstvené směsi je, že v těsném okolí zapalovací svíčky se vytvoří bohatá směs, kterou lze velmi dobře zažehnout a následně vzniklé čelo plamene postupuje dále do chudé směsi ve spalovacím prostoru. Vrstvené plnění má za následek snížení spotřeby paliva a zvýšení účinnosti motoru. Vzhledem k tomu, že se tato práce zabývá motory s vnější tvorbou směsi, je zde řešení přímého vstřikování paliva pro úplnost popsáno, nicméně pouze velmi okrajově.

6.1 Větší počet zapalovacích svíček

Jedním z technických opatření pro snížení variability pracovního cyklu může být použití většího počtu zapalovacích svíček na válec. Tradice používání 2 zapalovacích svíček (spolu se zdvojeným zapalováním) je spjata s leteckými motory, ve kterých plní zároveň bezpečnostní funkci. Téměř výhradně se používají 2 zapalovací svíčky umístěné v protilehlých místech spalovacího prostoru, existují však případy, kdy jsou použity 3 zapalovací svíčky. Ačkoliv při použití 2 zapalovacích svíček vznikají 2 ohniska zážehu opět ve velmi malém objemu v okolí jiskřišť svíček, tak může čelo plamene postupovat dále do nespálené směsi z 2 na sobě nezávislých míst. Tímto můžeme docílit zvýšení kvality zážehu a rychlosti hoření, stabilnějšího průběhu spalovacího procesu, dokonalejšího spálení směsi a zároveň i efektivnějšího využití rychle narůstajícího tlaku spalin. Na druhé straně je však toto řešení konstrukčně poměrně komplikované a drahé, tudíž se používá spíše u závodních automobilových popřípadě motocyklových motorů.

V sériové výrobě používaly a používají toto řešení vozidlové motory Alfa Romeo Twin Spark, Honda i-DSI (Intelligent Dual Sequential Ignition) nebo motory Mercedes-Benz M275 s tříventilovou technologií a motocykly Honda VT500 nebo Ducati Multistrada.

6.1.1 Alfa Romeo – Twin Spark

Alfa Romeo poprvé použila technologii Twin Spark již v roce 1914 a produkce motorů do sériových vozidel se rozšířila v polovině 80. let.

U motorů TS s dvouventilovým provedením jsou 2 identické zapalovací svíčky umístěné symetricky v protilehlých místech spalovacího prostoru. Zapalovací svíčky nezapalují současně, ale jedna vždy zapaluje se zpožděním. To má za následek, že se postupující čela plamenů nikdy nesetkají uprostřed dna pístu, kde je píst nejslabší.

U motorů TS se čtyřventilovým provedením je zapalovací svíčka umístěna uprostřed spalovacího prostoru v hlavě válců a druhá zapalovací svíčka s menším průměrem je na jeho kraji, mezi sacím a výfukovým ventilem. Tento přístup v umístění a velikosti zapalovacích svíček však nedosahuje takového zlepšení parametrů oproti dvouventilovému provedení.

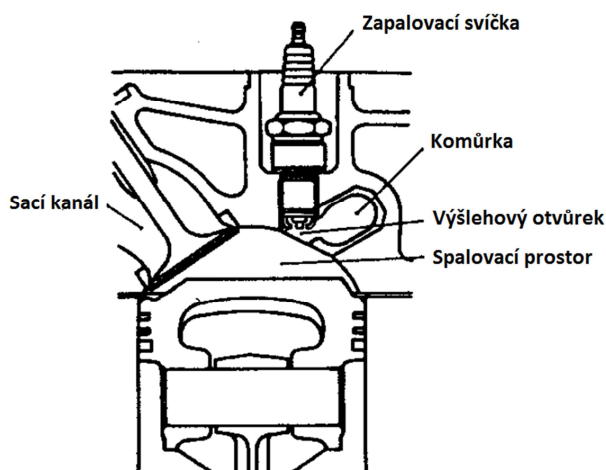
Nová generace motorů JTS (Jet Thrust Stoichiometric) používá přímě vstřikování paliva do válce a jednu zapalovací svíčku umístěnou uprostřed.

6.2 Komůrkový zážeh

Jako další technické řešení pro zlepšení kvality zážehu je tzv. komůrkový zážeh, nazývaný též Flame-jet Ignition (zapálení proudem plamene). Principem této konstrukce je vytvoření samostatné komůrky opatřené zapalovací svíčkou v hlavě válců motoru, která je se spalovacím prostorem spojena jedním či více otvůrkami, popřípadě tryskou. Do takto umístěné komůrky je při kompresním zdvihu pístu vtlačena homogenní směs paliva a vzduchu. Jakmile dojde k zažehnutí směsi a rozvoji hoření, výrazně vzroste v komůrce tlak, který způsobí proniknutí (vyšlehnutí) plamene otvůrkou či tryskou do dosud nespálené směsi ve spalovacím prostoru. Díky tomuto řešení není hlavní iniciace zážehu směsi ve spalovacím prostoru realizována pouze v malém prostoru u jiskřiště zapalovací svíčky, nýbrž vyšlehnutým turbulentním plamenem z otvůrků. Takto vyšlehnutý plamen má relativně velkou plochu a dokáže spolehlivě zažehnout i velmi chudé směsi.

Hlavní nevýhodou koncepce komůrkového zážehu je určité zvýšení tepelných ztrát motoru, způsobené stěnami spalovací komůrky a konstrukční komplikace.

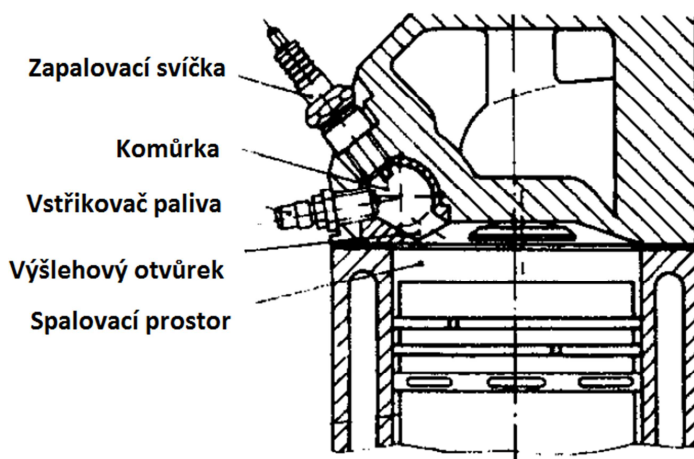
Z důvodu náročnosti na zástavbový prostor v hlavě válců motoru, se komůrkový zážeh používá především u stacionárních, pomaloběžných, plynových spalovacích motorů pracujících s velmi chudou směsí. Během technického vývoje vzniklo několik různých koncepcí komůrkového zážehu (viz obr. 10 až obr. 13).



Obr. 10 - Komůrkový zážeh – jednoduchý [7]

Provedení na (obr. 10) ukazuje nejjednodušší způsob komůrkového zážehu směsi, kde komůrka pouze zprostředkovává turbulentní vyšlenutí plamene do spalovacího prostoru. Objem komůrky odpovídá zhruba 20 % velikosti spalovacího prostoru. Hlavní nevýhodou koncepce je skutečnost, že komůrka není nikdy dokonale propláchnuta čerstvou

směsí, tudíž se v ní stále nacházejí spaliny z předchozího pracovního cyklu.



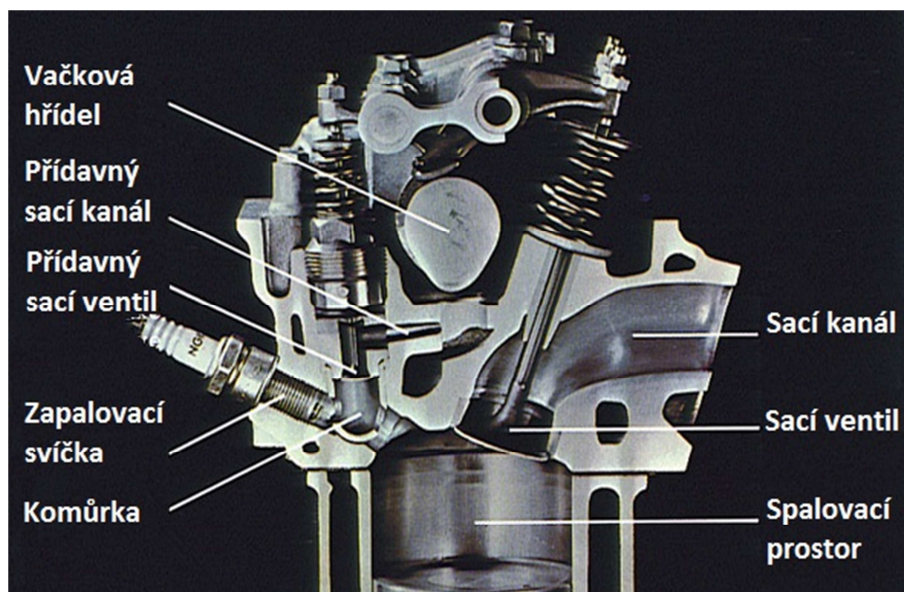
Obr. 11 - Komůrkový zážeh - vrstvené plnění směsi [7]

Provedení na (obr. 11) ukazuje komůrku s přídatným vstřikovačem paliva. Díky přídatnému vstřikování paliva přímo do komůrky dosáhneme vrstveného plnění směsi. V komůrce vzniká mírně bohatá směs, u které proběhne iniciace zážehu větší rychlostí. Následně dojde k vyšlenutí plamene

otvorem do chudé směsi ve spalovacím prostoru. Objem komůrky je obvykle v rozmezí 20 – 25 % spalovacího prostoru. U této koncepce je nevýhodou opět nedokonalé proplachování čerstvou směsí mezi pracovními cykly.

Obrázek 11 ukazuje provedení použité u vozidlového spalovacího motoru Honda CVCC (Compound Vortex Controlled Combustion) představeném v roce 1970. U tohoto provedení je do komůrky vyveden přídatný sací kanál, který zajišťuje plnění velmi bohatou směsí, zatímco hlavní sací kanál plní spalovací prostor naopak chudou směsí. Při kompresním zdvihu pístu je tato chudá směs natlačena do komůrky, tudíž ve chvíli vysokonapěťového výboje

zapalovací svíčky je směs mírně bohatá. Touto koncepcí je zajištěno rovněž velmi dobré proplachování komůrky čerstvou směsí.

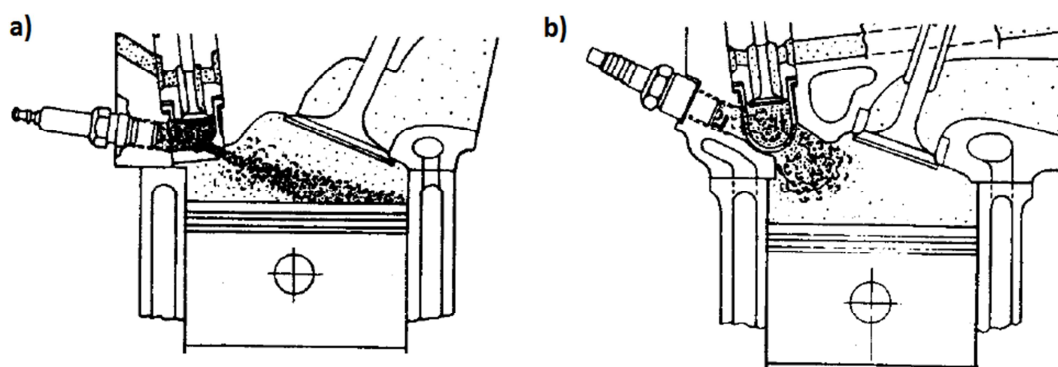


Obr. 12 - Komůrkový zážeh - Honda CVCC [16]

Na tlakové poměry v komůrce, způsob výšlehu plamene z kanálků a následnou rychlost hoření ve válci má zásadní vliv průměr výšlekových kanálků a objem komůrky.

Obrázek 13a ukazuje případ, kdy je použito malého objemu komůrky (2 – 3 % spalovacího prostoru) a malého průměru otvůrků, což vyvolává hluboký průnik plamene do spalovacího prostoru způsobující rychlé hoření směsi.

Naopak obrázek 13b ukazuje provedení Honda CVCC, kde je použito většího objemu komůrky (5 – 12 % objemu spalovacího prostoru) a větší výšlekové kanálky, což má za následek menší rychlost průniku plamene do spalovacího prostoru a nižší rychlost hoření.

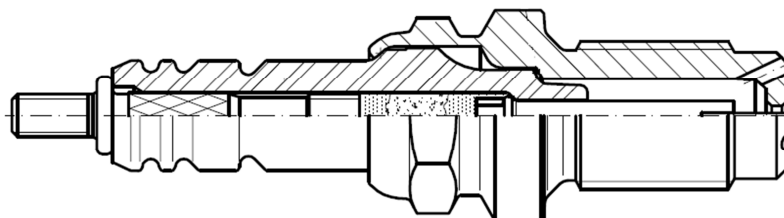


Obr. 13 - Vliv rozměrů komůrky na rychlost výšlehu plamene [7]

6.3 Zapalovací svíčka s integrovanou komůrkou

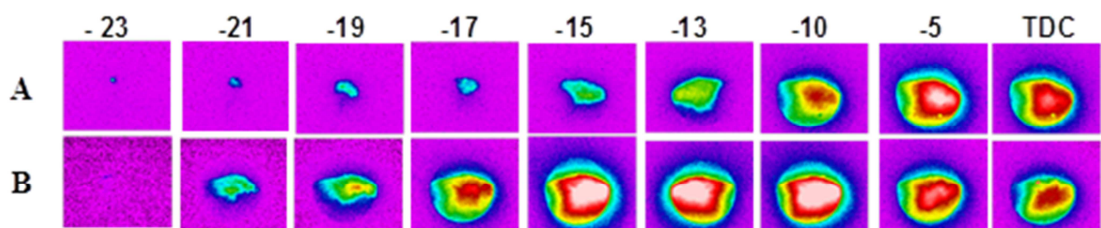
Komůrkový zážeh vyžaduje poměrně velký zástavbový prostor v hlavě válců motoru, a proto je ve vozidlových motorech málo používán. Na Katedře vozidel a motorů Technické univerzity v Liberci probíhá výzkum a vývoj zapalovací svíčky s integrovanou komůrkou, která kombinuje výhody komůrkového zážehu spolu se zástavbovým prostorem odpovídajícím klasické zapalovací svíčce.

Zapalovací svíčka s integrovanou komůrkou funguje na stejném principu jako motory s komůrkovým zážehem, kdy je homogenní směs při kompresním zdvihu pístu vtlačena do objemu komůrky, zažehnuta a po prudkém nárůstu tlaku dojde k jejímu vyšlehnutí otvůrky do spalovacího prostoru. U této svíčky je použit klasický izolátor s prodlouženou elektrodou, která spolu s vedlejší elektrodou, sestávající se z vnitřní stěny komůrky, tvoří jiskřiště. Izolátory s prodlouženou elektrodou byly zhotoveny ve spolupráci se společností Brisk Tábor a.s. Ověřovací zkoušky a měření s komůrkovou svíčkou na zkušebním motoru byly prováděny na skládané svíčce s integrovanou komůrkou, u které bylo pouzdro s izolátorem spojeno převlečnou maticí.



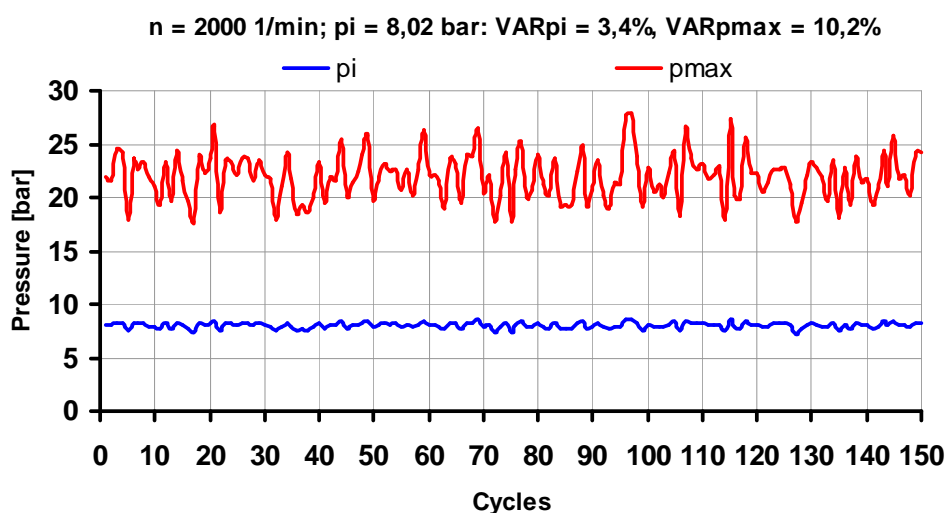
Obr. 14 - Zapalovací svíčka s integrovanou komůrkou [4]

Na Obr. 14 je ukázáno jedno z prvních provedení svíčky s integrovanou komůrkou, u kterého jsou použity 3 výšlekové otvůrky o průměru 1.6 mm a centrální výšlekový otvůrek o průměru 4 mm. Do centrálního otvůrku ve dně komůrky zasahuje prodloužená střední elektroda o průměru 2mm, která spolu s okrajem dna tvoří jiskřiště svíčky. Objem komůrky činí 0.8 – 1 cm³.

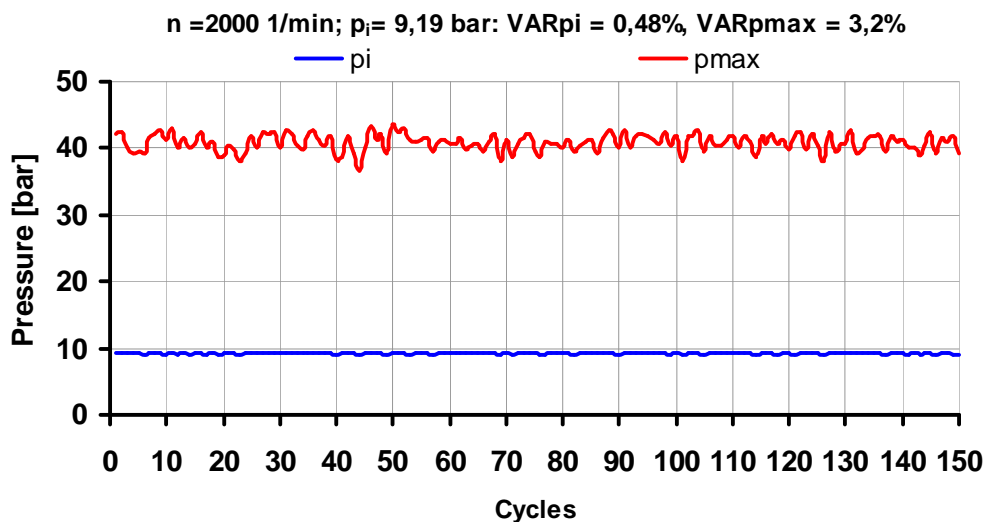


Obr. 15 - Vizualizace postupu hoření [4]

Na obr. 15 jsou ukázány vizualizační záznamy postupu hoření změřené na starším 2 ventilovém motoru Škoda 1.4 MPI (OHV). Řada A ukazuje zážeh klasickou zapalovací svíčkou a řada B zážeh svíčkou s integrovanou komůrkou. Můžeme zde vidět, že u zážehu pomocí svíčky s integrovanou komůrkou dojde k rozvoji hoření mnohem rychleji.



Obr. 16 - Průběh hodnot tlaků p_i a p_{max} pro zážeh klasickou svíčkou [4]



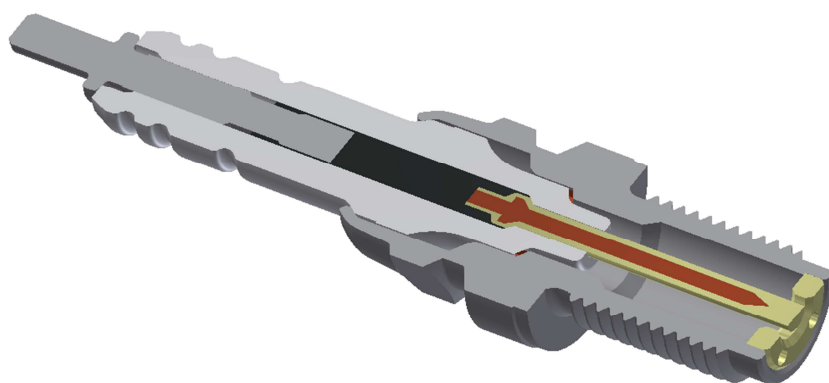
Obr. 17 - Průběh hodnot tlaků p_i a p_{max} pro zážeh svíčkou s integrovanou komůrkou [4]

Na obr. 16 a obr. 17 je zobrazen průběh hodnot středního indikovaného tlaku a maximálních hodnot spalovacího tlaku u 150 po sobě následujících pracovních cyklů při stejném nastavení škrticí klapky. U zážehu pomocí zapalovací svíčky s integrovanou komůrkou můžeme pozorovat výrazné zlepšení jak průběhu středního indikovaného tlaku z $p_i = 8.02$ bar na $p_i = 9.19$ bar, tak snížení mezicyklové variability maximálního spalovacího tlaku o 8 % na hodnotu $VAR_{p_{max}} = 3.2\%$ a variability středního indikovaného tlaku na hodnotu $VAR_{p_i} = 0.48\%$.

Při použití zapalovací svíčky s integrovanou komůrkou bylo dosaženo značného zlepšení mezicyklové variability spalovacího motoru při plném zatížení, avšak při volnoběhu, popřípadě režimech částečného zatížení, dosahovala tato svíčka v některých případech výrazně horších hodnot než klasická zapalovací svíčka.

Z toho důvodu byly provedeny další vývojové a konstrukční práce, vedoucí ke zlepšení funkčnosti svíčky především v režimech částečného zatížení motoru, jejichž výsledkem bylo prodloužení střední elektrody až do nejspodnější partie svíčky.

Současné provedení pouzdra svíčky (viz obr. 18) je v nejspodnější partii opatřeno dnem se 4 výšlehovými otvůrkami o průměru 1.4 mm a středním výšlehovým otvůrkem o průměru 4.4 mm a prodlouženou střední elektrodou o průměru 2.4 mm. Z důvodu vysokého tepelného namáhání je dno vyrobeno z 99% slitiny niklu. Materiál pouzdra svíčky je automatová ocel 11 110. Dno je do spodní partie pouzdra svíčky nalisováno a pro spolehlivé spojení je po obvodě opatřeno TIG svarem. Pro konstrukci zapalovací svíčky s integrovanou komůrkou je velmi důležité dodržení požadovaných teplot ve spodní partii pouzdra, kdy

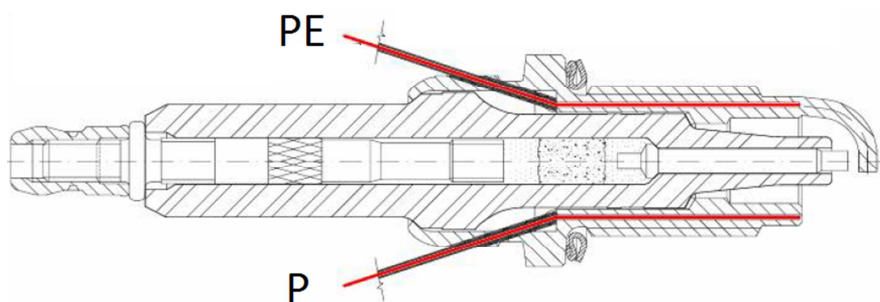


spodní hranicí teplotního rozsahu je samočistící teplota a horní hranicí teplota, při které by již mohlo docházet k samozápalům.

Obr. 18 - Současné provedení zapalovací svíčky s integrovanou komůrkou

7 Měření teplot pouzdra klasické zapalovací svíčky

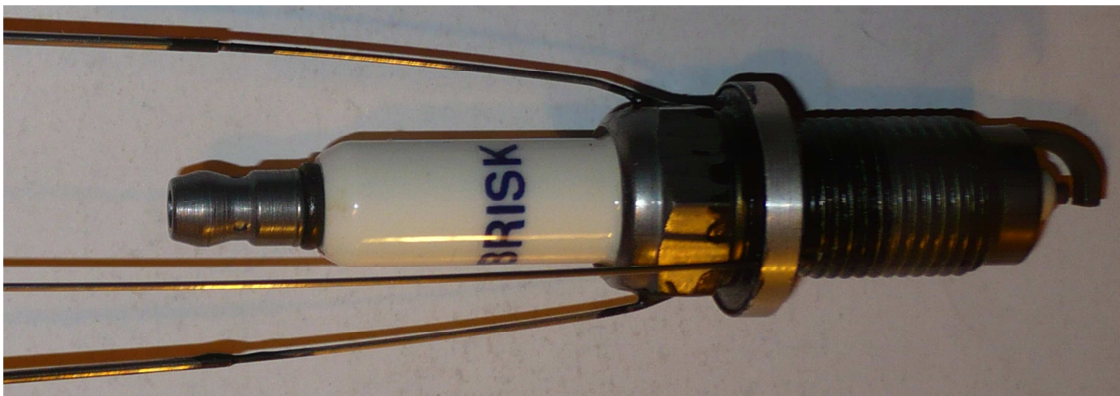
Teploty pouzdra klasické zapalovací svíčky byly změřeny v jeho nejspodnější partii. Pro tyto účely, bylo v laboratoři KVM speciálně upravené pouzdro zapalovací svíčky, v jehož obvodu byla vyvrtaná dvojice otvůrků o průměru 0.45 mm, do hloubky 0.5 mm od dna pouzdra, do kterých byl následně vložen oplášťovaný mikrotermočlánek (typ J). U klasické svíčky byl první mikrotermočlánek umístěn nad vedlejší elektrodou, a druhý po obvodu na protilehlém místě (viz obr. 19).



Obr. 19 - Umístění mikrotermočláneků v pouzdře klasické zapalovací svíčky [9]

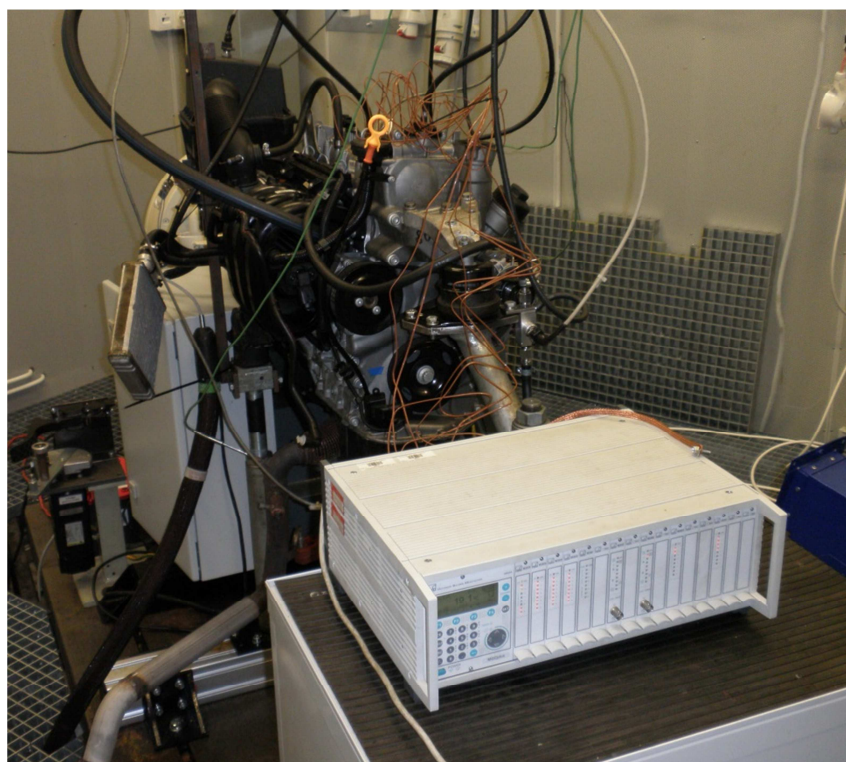
Měření bylo provedeno v laboratořích KVM na zážehovém spalovacím motoru Škoda 1.2 HTP s označením EA111.03E. Po zašroubování a dotažení měřících svíček bylo zaznamenáno polohování mikrotermočláneků P a PE vzhledem k sacím kanálům hlavy válce motoru (viz obr. 23 a obr. 24). Pro samotné měření byla použita měřící ústředna HBM MGCPlus (viz obr. 21) a k ní výrobcem dodávaný software catman®Easy. Při spuštění měřícího softwaru bylo zjištěno, že při montáži byl poškozen termočlánek P na 1. válci, proto nejsou k dispozici naměřené hodnoty. Při diskuzi naměřených hodnot zejména ve 2. válci bylo dospěno k závěru, že při montáži došlo k povytažení jednotlivých mikrotermočláneků a hodnoty proto nejsou relevantní.

Pro ověření správnosti naměřených hodnot bylo provedeno opakované měření. Speciální měřící svíčka, doplněná oproti předchozímu případu o mikrotermočlánek připevněný ve vnější podložce, byla umístěna v 1. válci motoru. Při montáži zapalovacího modulu však došlo k poškození termočláneků s označením 1P proti vnější elektrodě.

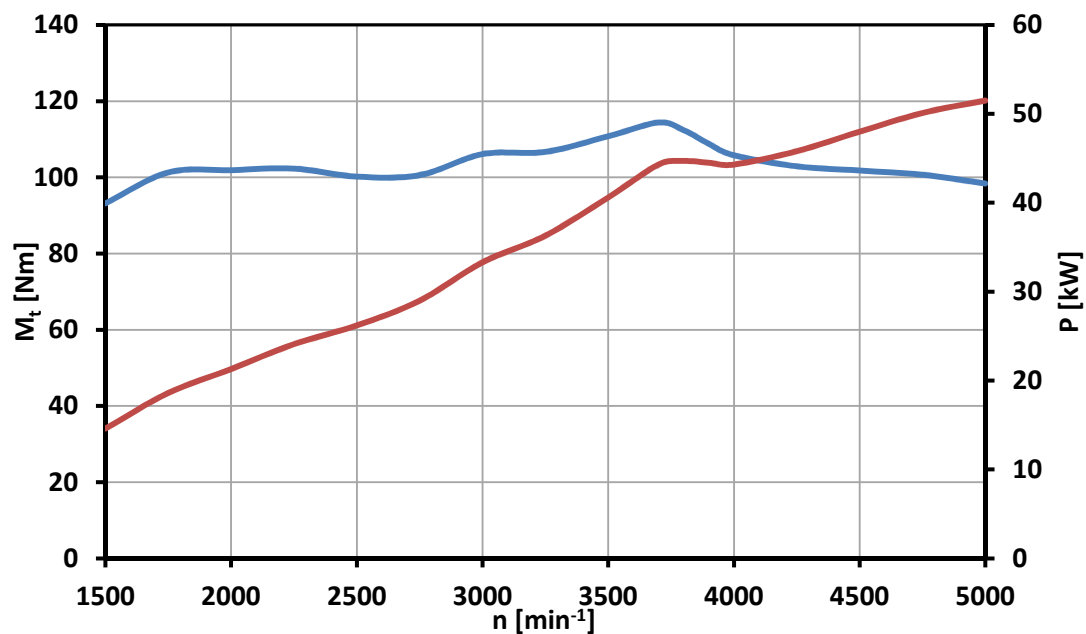


Obr. 20 - Fotografie měřicí svíčky použité pro opakované měření

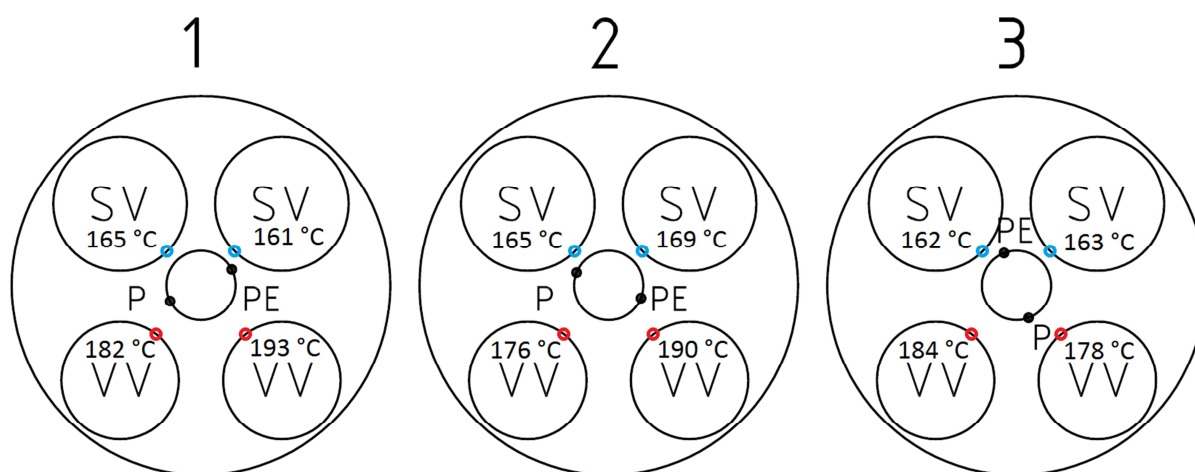
Teploty v nejspodnější partii zapalovací svíčky byly naměřeny v režimu vnější otáčkové charakteristiky motoru (viz obr. 20). Záznam měřených teplot byl proveden po jejich ustálení v každém provozním režimu motoru vždy po dobu 2 minut s krokem záznamu 2 s.



Obr. 21 - Fotografie připraveného měření

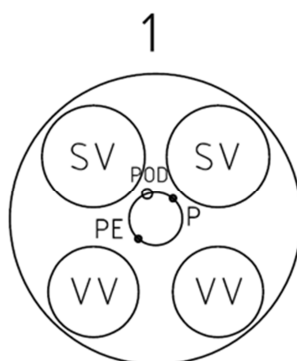


Obr. 22 - Naměřená vnější otáčková charakteristika motoru

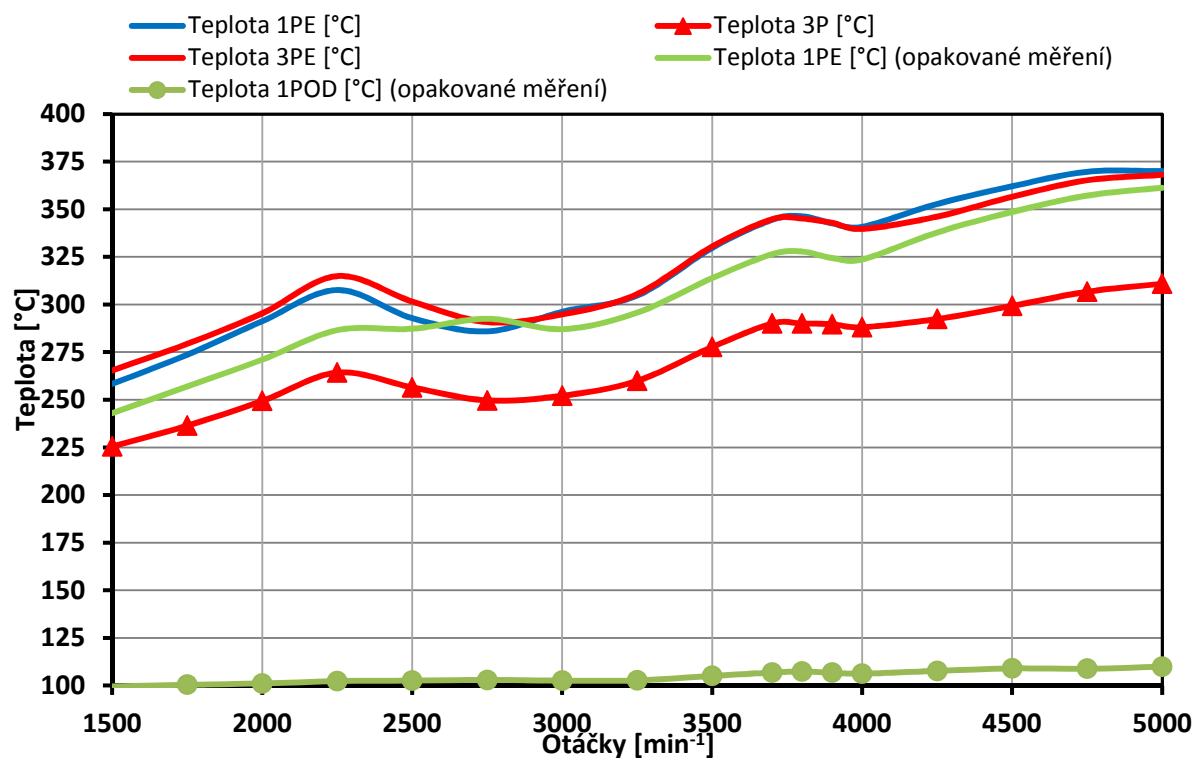


Obr. 23 - Polohování měřících míst na pouzdře zapalovací svíčky 18. 11. 2013

Na obvodu ventilů v místech proti zapalovací svíčce jsou změřené teploty ventilových sedel v režimu jmenovitého výkonu [19]



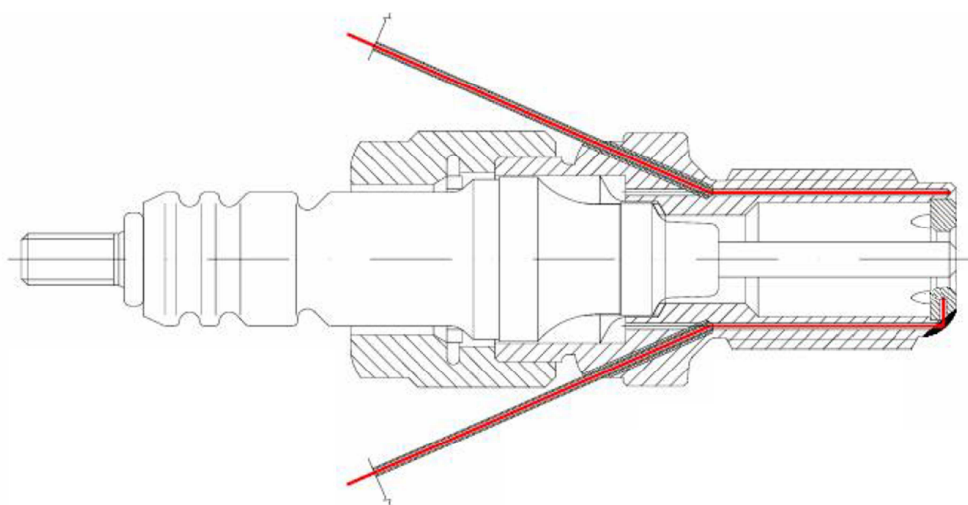
Obr. 24 - Polohování měřících míst na pouzdře svíčky (opakované měření) 12. 12. 2013



Obr. 25 - Teploty pouzdra zapalovací svíčky v závislosti na otáčkách motoru

Na termočláncích PE válce 1 a 3 a opakovaného měření na válci 1 je vidět velmi dobrá shoda naměřených teplot. Vzhledem k poničení termočláncu P při opakovaném měření, není dostupná hodnota pro porovnání teplot proti vedlejší elektrodě.

7.1 Měření teplot pouzdra komůrkové zapalovací svíčky



Obr. 26 - Umístění mikrotermočlánků v pouzdře komůrkové zapalovací svíčky [9]

Na obrázku 26 je zobrazeno pouzdro měřící komůrkové svíčky. Po obvodu pouzdra, jsou podobně jako u měřícího pouzdra klasické svíčky vyvrtány 2 otvůrky o průměru 0.45 mm, pro umístění mikrotermočlánků až do nejspodnější partie svíčky. Pro zkušební vzorky zapalovací svíčky s integrovanou komůrkou není izolátor připevněn k pouzdru typickým zalisováním nejvrchnější části, nýbrž je dotažen pomocí speciální převlečné matice, umožňující relativně snadnou výměnu pouzdra s komůrkou při výzkumu vlivu geometrie komůrky na parametry průběhu hoření a parametry pracovního oběhu motoru.

Z technických důvodů nebylo v době vypracovávání diplomové práce měření teplot na komůrkové zapalovací svíčce provedeno. Pro verifikaci výpočtových modelů slouží naměřené teploty na pouzdře klasické zapalovací svíčky.

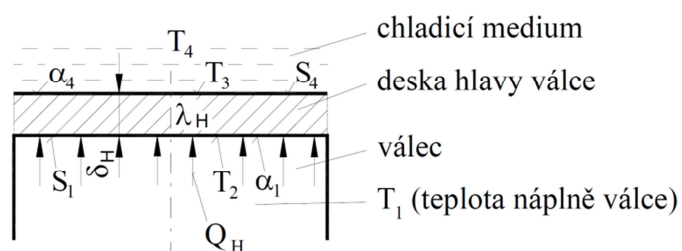
8 Modelování teplotního pole na klasické zapalovací svíčke

8.1 Výpočet přestupu tepla

8.1.1 Teoretické odvození vztahů

Určujícími parametry pro přestup tepla mezi náplní válce a stěnami (hlavy motoru, válce) jsou teplota náplně válce T_1 , velikost teplosměnné plochy S_1 , součinitel přestupu tepla α_1 a střední teplota stěny T_2 . Vyjma poslední jmenované T_2 se tyto parametry mění v závislosti na fázi pracovního oběhu, resp. pootočení klikového hřídele. Množství tepla, které přestoupí mezi náplní válce do určité plochy (např. hlavy válců) během jednoho pracovního oběhu, lze popsat zjednodušeným vztahem:

$$Q_1 = \sum_{i=0^{KH}}^{720^{KH}} \alpha_i \cdot S_i \cdot (T_{1i} - T_2) \cdot \Delta\tau_i \quad (5)$$



Obr. 27 - Schéma pro výpočtový odhad střední teploty stěny[8]

Pro ustálený provozní režim motoru však můžeme střední teplotu stěny T_2 výpočtově odhadnout a určit množství tepla Q_{HL} , které během celého pracovního oběhu přestoupí do stěny hlavy motoru.

Přestup tepla z náplně válce do stěny hlavy motoru Q_H se mění v závislosti na průběhu pracovního cyklu motoru, avšak vedení tepla deskou hlavy motoru a přestup tepla z desky hlavy motoru do chladicího média lze považovat za časově ustálené toky. Potom stejné množství tepla, které přestoupí z náplně válce do hlavy motoru Q_H , bude následně odvedeno deskou hlavy motoru a musí přestoupit do chladicího média. Tento předpoklad lze vyjádřit vztahy:

$$Q_{HL} = \frac{\delta_H}{\lambda_H} \cdot S_4 \cdot (T_2 - T_3) \cdot \Delta\tau_o \quad (6)$$

$$Q_{HL} = \alpha_4 \cdot S_4 \cdot (T_3 - T_4) \cdot \Delta\tau_o \quad (7)$$

8.1.2 Přestup tepla do hlavy válců

Samotný výpočet pro přestup tepla do hlavy válců motoru a pouzdra klasické, resp. komůrkové svíčky byl zjednodušeně proveden v softwaru Microsoft Excel 2010 (kopie je přiložena k diplomové práci). Proto se zde budu zabývat pouze obecným postupem výpočtu. Pro určení střední povrchové teploty stěny hlavy motoru pro daný režim motoru byl použit vztah vyjádřený z rovnic (6) a (7):

$$T_{Hstř} = \left(\frac{\delta_H}{\lambda_H} + \frac{1}{\alpha_4} \right) \cdot \frac{Q_H}{S_{HL} \cdot \Delta\tau_o} + T_4 \quad (8)$$

$T_{Hstř}$	=	střední teplota stěny hlavy válců	[K]
δ_H	=	tloušťka hlavy motoru v místě prostupu tepla	[m]
λ_H	=	součinitel tepelné vodivosti pro materiál hlavy válců	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
α_4	=	součinitel přestupu tepla pro chladicí médium	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
Q_{HL}	=	teplo přestoupené do hlavy motoru	[J]
S_{HL}	=	plocha stěny hlavy v místě přestupu tepla	[m ²]
$\Delta\tau_o$	=	časový interval	[s]
T_4	=	teplota chladicího media	[K]

Díky tomuto výpočtovému odhadu střední teploty stěny je možno v případě většího nesouladu mezi předběžným odhadem teploty stěny a výsledkem kontroly provést opakovaný výpočet, pomocí kterého dosáhneme postupnými iteracemi relativně přesného odhadu.

Výpočet byl prováděn v krocích, jejichž velikost odpovídala pootočení klikové hřídele motoru o $i = 1^\circ$. Časový interval, kdy motor vykoná 2 otáčky, resp. jeden pracovní cyklus, lze určit vztahem.

$$\Delta\tau_o = \frac{720}{6 \cdot n} \quad (9)$$

$\Delta\tau_o$	=	časový interval, za který se KH otočí o 720°	[s]
n	=	otáčky motoru	[min ⁻¹]

Odkud lze vyjádřit časový interval za který se KH pootočí o 1°.

$$\Delta\tau_i = \frac{\Delta\tau_o}{720} \quad (10)$$

$\Delta\tau_i$	=	časový interval, za který se KH otočí o 1°	[s]
$\Delta\tau_o$	=	časový interval, za který se KH otočí o 720°	[s]

Při výpočtu přestupu tepla je nejdůležitější veličinou právě součinitel přestupu tepla.

Eichelbergův vztah pro výpočet součinitele přestupu tepla:

$$\alpha_i = 2.435 \cdot \sqrt[3]{c_s} \cdot \sqrt{p_{NVi} \cdot T_{NVi}} \quad (11)$$

α_i	=	součinitel přestupu tepla	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
c_s	=	střední pístová rychlost	[m·s ⁻¹]
p_{NVi}	=	tlak náplně ve válci	[MPa]
T_{NVi}	=	teplota náplně ve válci	[K]

Vztah pro střední pístovou rychlost:

$$c_s = \frac{z \cdot n}{30} \quad (12)$$

c_s	=	střední pístová rychlost	[m·s ⁻¹]
z	=	zdvih motoru	[m]
n	=	otáčky motoru	[min ⁻¹]

Přestup tepla do hlavy válců Q_{HL} je během průběhu celého pracovního cyklu časově proměnlivý. Proto bude výsledná hodnota přestoupeného tepla dána součtem všech dílčích hodnot v průběhu pracovního cyklu dle vztahu:

$$Q_{HL} = \sum_{i=0^{o}KH}^{720^{o}KH} \alpha_i \cdot S_{HL} \cdot (T_{NVi} - T_{HOstř}) \cdot \Delta\tau_i \quad (13)$$

Q_{HL}	=	teplo přestoupené do hlavy válců	[J]
α_i	=	součinitel přestupu tepla	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
S_{HL}	=	plocha stěny hlavy v místě přestupu tepla	[m ²]
T_{NVi}	=	teplota náplně ve válci	[K]
$T_{HOstř}$	=	odhadnutá střední teplota stěny hlavy válců	[K]
$\Delta\tau_i$	=	časový interval, za který se KH otočí o 1°	[s]

Pokud se bude hodnota $T_{Hstř}$ odlišovat od odhadnuté teploty $T_{HOstř}$, je nutné hodnotu $T_{HOstř}$ zadat znovu a provádět iterace až do chvíle, kdy budou tyto hodnoty $T_{HOstř}$ a $T_{Hstř}$ téměř totožné.

V tuto chvíli je možno určit tepelný tok, vstupující do hlavy motoru jednoduchou úpravu, kdy teplo přestoupené do hlavy motoru vydělíme časovým intervalem $\Delta\tau_o$, dle vztahu:

$$\dot{Q}_{HL} = \frac{Q_{HL}}{\Delta\tau_o} \quad (14)$$

\dot{Q}_{HL}	=	tepelný tok do hlavy válců	[W]
Q_{HL}	=	teplo přestoupené do hlavy válců	[J]
$\Delta\tau_o$	=	časový interval, za který se KH otočí o 720°	[s]

8.1.2 Přestup tepla do klasické svíčky

Pro zjednodušení výpočtu přestupu tepla do zapalovací svíčky se předpokládá, že teplo působí bezprostředně na všechny stěny zapalovací svíčky. Nejspodnější partie zapalovací svíčky je pro výpočet přestupů tepla rozdělena na jednotlivé části s definovanou velikostí teplosměnné plochy a její odhadnutou střední teplotou. Bude proto uvažován

přestup tepla do samotného pouzdra, izolátoru, vedlejší a střední elektrody. Součinitel přestupu tepla je uvažován totožný jako u přestupu tepla do stěn hlavy motoru.

$$Q_{KL} = \sum_{i=0^{\circ}KH}^{720^{\circ}KH} \alpha_i \cdot S_{KL} \cdot (T_{NVi} - T_{KLstř}) \cdot \Delta\tau_i \quad (15)$$

Q_{KL}	=	teplo přestoupené do pouzdra klasické svíčky	[J]
α_i	=	součinitel přestupu tepla	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
S_{KL}	=	plocha pouzdra klasické svíčky	[m ²]
T_{NVi}	=	teplota náplně ve válci	[K]
$T_{KLstř}$	=	odhadnutá střední teplota stěny pouzdra klasické svíčky	[K]
$\Delta\tau_i$	=	časový interval, za který se KH otočí o 1°	[s]

Tepelný tok vstupující do pouzdra klasické svíčky určím dle vztahu:

$$\dot{Q}_{KL} = \frac{Q_{KL}}{\Delta\tau_o} \quad (16)$$

\dot{Q}_{KL}	=	tepelný tok do pouzdra klasické svíčky	[W]
Q_{KL}	=	teplo přestoupené do pouzdra klasické svíčky	[J]
$\Delta\tau_o$	=	časový interval, za který se KH otočí o 720°	[s]

Protože je přestup tepla do jednotlivých částí zapalovací svíčky realizován za použití typově stejných vztahů jako (15) a (16) pouze s rozdílnou velikostí teplosměnné plochy a její odhadnuté střední teploty, není nutné je zde rozepisovat. Dále bylo vypočteno:

- teplo přestoupené do izolátoru Q_{KLIZ} a tepelný tok do izolátoru \dot{Q}_{KLIZ}
- teplo přestoupené do střední elektrody $Q_{KLSTŘ}$ a tepelný tok do střední elektrody $\dot{Q}_{KLSTŘ}$
- teplo přestoupené do vedlejší elektrody Q_{KLVED} a tepelný tok do vedlejší elektrody \dot{Q}_{KLVED}

8.1.3 Přestup tepla do komůrkové svíčky

Určení přestupu tepla do pouzdra komůrkové, resp. klasické zapalovací svíčky je provedeno prakticky totožně pro obě provedení. Stejně jako v případě klasické svíčky byla i zde nejspodnější partie rozdělena na jednotlivé části. V tomto případě se jedná o samotné pouzdro svíčky, dno komůrky, tvořící zároveň vedlejší elektrodu a střední elektrodu. Teplo přivedené do izolátoru můžeme vzhledem ke konstrukci svíčky (malá teplosměnná plocha izolátoru v komůrce) zanedbat.

$$Q_{KOM} = \sum_{i=0^{°KH}}^{720^{°KH}} \alpha_i \cdot S_{KOM} \cdot (T_{NVi} - T_{KOM}) \cdot \Delta\tau_i \quad (17)$$

Q_{KOM}	=	teplo přestoupené do pouzdra komůrkové svíčky	[J]
α_i	=	součinitel přestupu tepla	$[W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$
S_{KOM}	=	plocha pouzdra komůrkové svíčky	$[m^2]$
T_{NVi}	=	teplota náplně ve válci	[K]
T_{KOM}	=	odhadnutá střední teplota stěny pouzdra komůrkové svíčky	[K]
$\Delta\tau_i$	=	časový interval, za který se KH otočí o 1°	[s]

$$\dot{Q}_{KOM} = \frac{Q_{KOM}}{\Delta\tau_o} \quad (18)$$

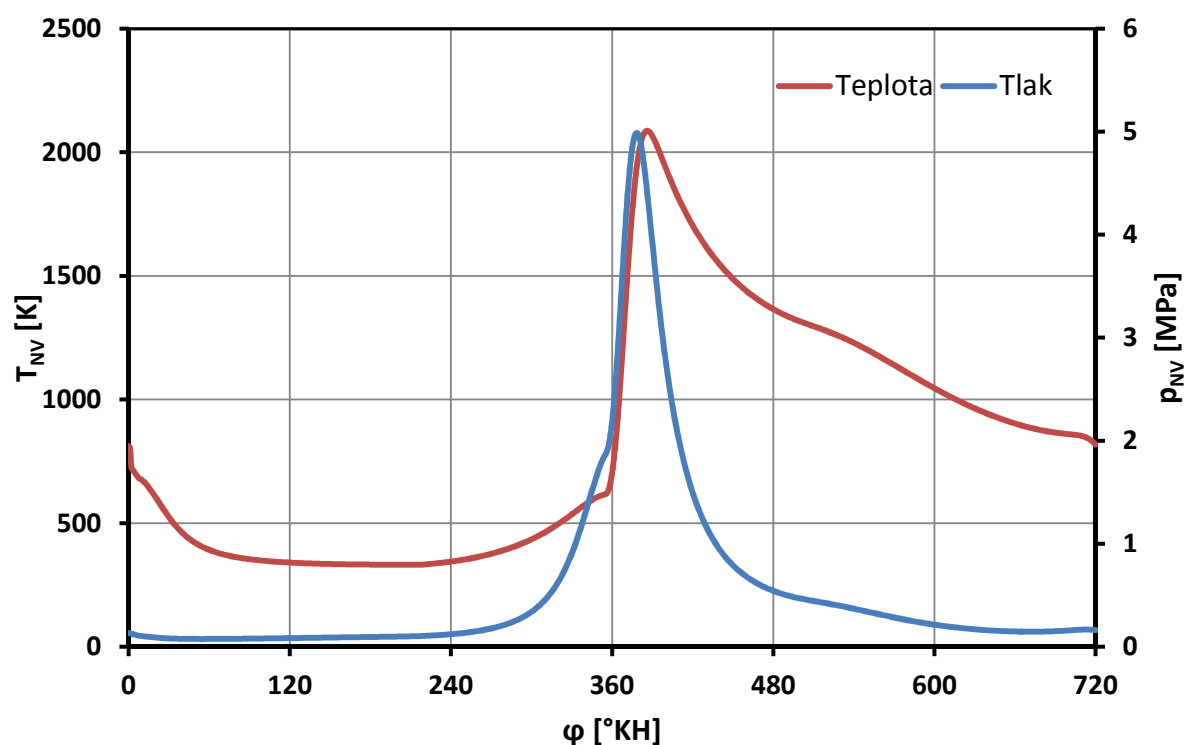
\dot{Q}_{KOM}	=	tepelný tok do pouzdra komůrkové svíčky	[W]
Q_{KOM}	=	teplo přestoupené do pouzdra komůrkové svíčky	[J]
$\Delta\tau_o$	=	časový interval, za který se KH otočí o 720°	[s]

Stejně jako v předchozím případě bylo i zde dále vypočteno:

- teplo přestoupené do dna komůrky $Q_{KOM_{DNO}}$ a tepelný tok do dna komůrky $\dot{Q}_{KOM_{DNO}}$
- teplo přestoupené do střední elektrody $Q_{KOM_{STŘ}}$ a tepelný tok do střední elektrody $\dot{Q}_{KOM_{STŘ}}$

8.1.4 Popis výpočtu

Pro samotný výpočet byly použity výstupní hodnoty z programu TLAK.xls, (vlastní SW na Katedře vozidel a motorů), a do kterého byly zadány všechny potřebné parametry zkoušeného motoru a hodnoty jeho provozního režimu, ve kterém je prováděno výpočtové modelování teplotního pole na zapalovací svíče. V tomto případě se bude simulace zabývat nejméně příznivým provozním režimem, kdy je motor provozován při maximálním výkonu při otáčkách 5000 min^{-1} . Z exportovaných hodnot byl vytvořen průběh tlaku a teploty náplně ve válci v závislosti na pootočení klikového hřídele.



Obr. 28 - Průběh teploty a tlaku náplně ve válci během pracovního cyklu

8.1.5 Zadané hodnoty

Otáčky motoru	n [min ⁻¹]	=	5000
Zdvih motoru	z [m]	=	0,0869
Tloušťka stěny hlavy v místě přestupu	δ_H [m]	=	0,01
Součinitel tepelné vodivosti hlavy válců	λ_H [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	=	155
Součinitel přestupu tepla chladicí kapaliny	α [W·m ⁻² ·K ⁻¹]	=	4000
Teplota chladicího média	T_4 [K]	=	368

Parametry pro výpočet přestupů tepla do hlavy válců

Plocha pro přestup tepla do hlavy válců	S_{HL} [m ²]	=	0,005
Odhadnutá střední teplota stěn hlavy válců	$T_{HOstř}$ [K]	=	460

Parametry pro výpočet přestupů tepla do klasické svíčky:

Plocha pouzdra	S_{KL} [m ²]	=	0,00035
Odhadnutá střední teplota stěn pouzdra	$T_{KLstř}$ [K]	=	550
Plocha izolátoru	S_{KL_IZ} [m ²]	=	0,00008
Odhadnutá střední teplota izolátoru	$T_{IZstř}$ [K]	=	750
Plocha střední elektrody	S_{KL_STR} [m ²]	=	0,00002
Odhadnutá střední teplota střední elektrody	$T_{STRstř}$ [K]	=	750
Plocha vedlejší elektrody	S_{KL_VED} [m ²]	=	0,000055
Odhadnutá střední teplota vedlejší elektrody	$T_{VEDstř}$ [K]	=	700

Parametry pro výpočet přestupů tepla do komůrkové svíčky:

Plocha pouzdra	S_{KOM} [m ²]	=	0,0006
Odhadnutá střední teplota stěn pouzdra	T_{KOM} [K]	=	550
Plocha dna komůrkové svíčky	S_{KOM_DNO} [m ²]	=	0,00018
Odhadnutá střední teplota dna pouzdra komůrky	$T_{DNOstř}$ [K]	=	650
Plocha střední elektrody	S_{KOM_STR} [m ²]	=	0,000075
Odhadnutá střední teplota střední elektrody	$T_{KOMstř}$ [K]	=	750

Tab. 1 - Zadané hodnoty pro výpočet tepelných toků

8.1.6 Výsledné hodnoty (výpočty se součinitelem přestupu tepla dle Eichelberga)

Časová konstanta pro jeden cyklus	$\Delta\tau$ [s]	=	0,024
Časová konstanta pro pootočení o 1° KH	$\Delta\tau_i$ [s]	=	0,000033
Střední pístová rychlost	c_s [m/s]	=	14,48
Střední teplota stěny hlavy válců	T_{HL} [K]	=	460

Hlava válců:

Přestoupené teplo do hlavy válců	Q_{HL} [J]	=	35,1
Tepelný tok do hlavy válců	q_{HL} [W]	=	1465

Klasická svíčka

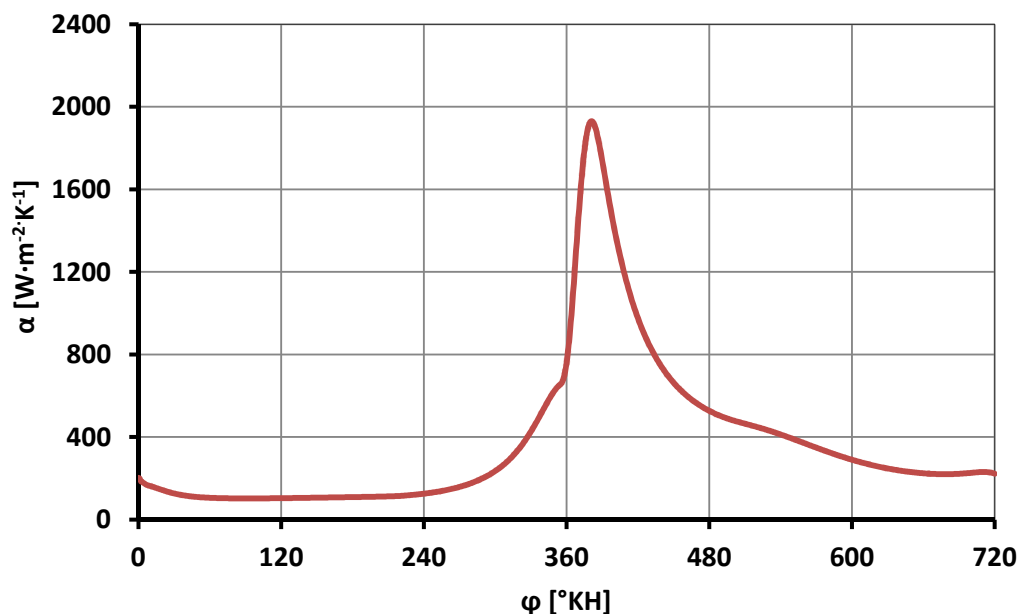
Přestoupené teplo do pouzdra	Q_{KL} [J]	=	2,2
Tepelný tok do pouzdra	Q'_{KL} [W]	=	91
Přestoupené teplo do izolátoru	Q_{KL_IZ} [J]	=	0,4
Tepelný tok do izolátoru	Q'_{KL_IZ} [W]	=	15
Přestoupené teplo do střední elektrody	Q_{KL_STR} [J]	=	0,1
Tepelný tok do střední elektrody	Q'_{KL_STR} [W]	=	4
Přestoupené teplo do vedlejší elektrody	Q_{KL_VED} [J]	=	0,3
Tepelný tok do vedlejší elektrody	Q'_{KL_VED} [W]	=	11

Komůrková svíčka:

Přestoupené teplo do pouzdra komůrkové svíčky	Q_{KOM} [J]	=	3,7
Tepelný tok do pouzdra	Q'_{KOM} [W]	=	155
Přestoupené teplo do dna komůrky	Q_{KOM_DNO} [J]	=	1,0
Tepelný tok do dna komůrky	Q'_{KOM_DNO} [W]	=	40
Přestoupené teplo do střední elektrody	Q_{KOM_STR} [J]	=	0,3
Tepelný tok do střední elektrody	Q'_{KOM_STR} [W]	=	14

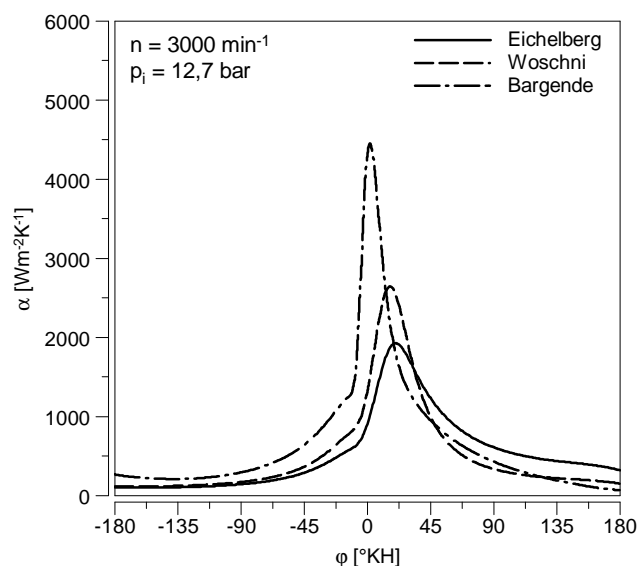
Tab. 2 - Výsledné hodnoty výpočtu tepelných toků

V dalším kroku byl vypočten součinitel přestupu tepla podle Eichelberga viz. Obr. 28.



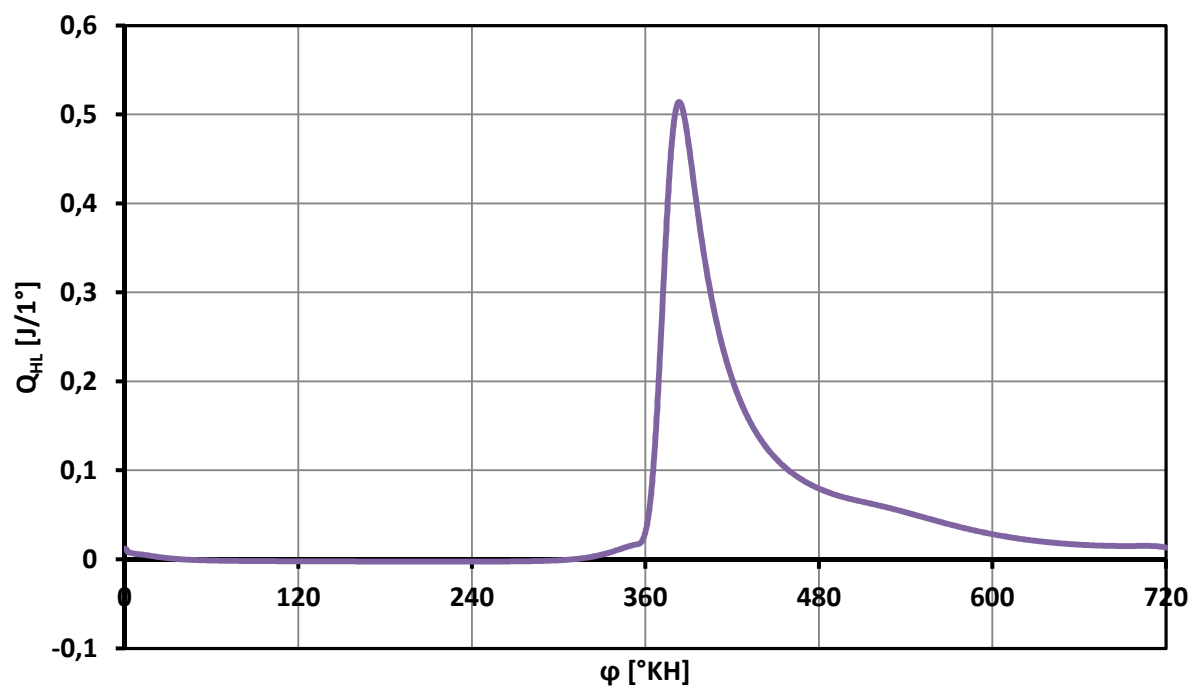
Obr. 29 - Součinitel přestupu tepla podle Eichelberga v průběhu pracovního cyklu

V diplomové práci je součinitel přestupu tepla vypočten programem Tlak.xls podle Eichelberga, který empirický vztah formuloval již v roce 1939. Novější vztahy pro určení

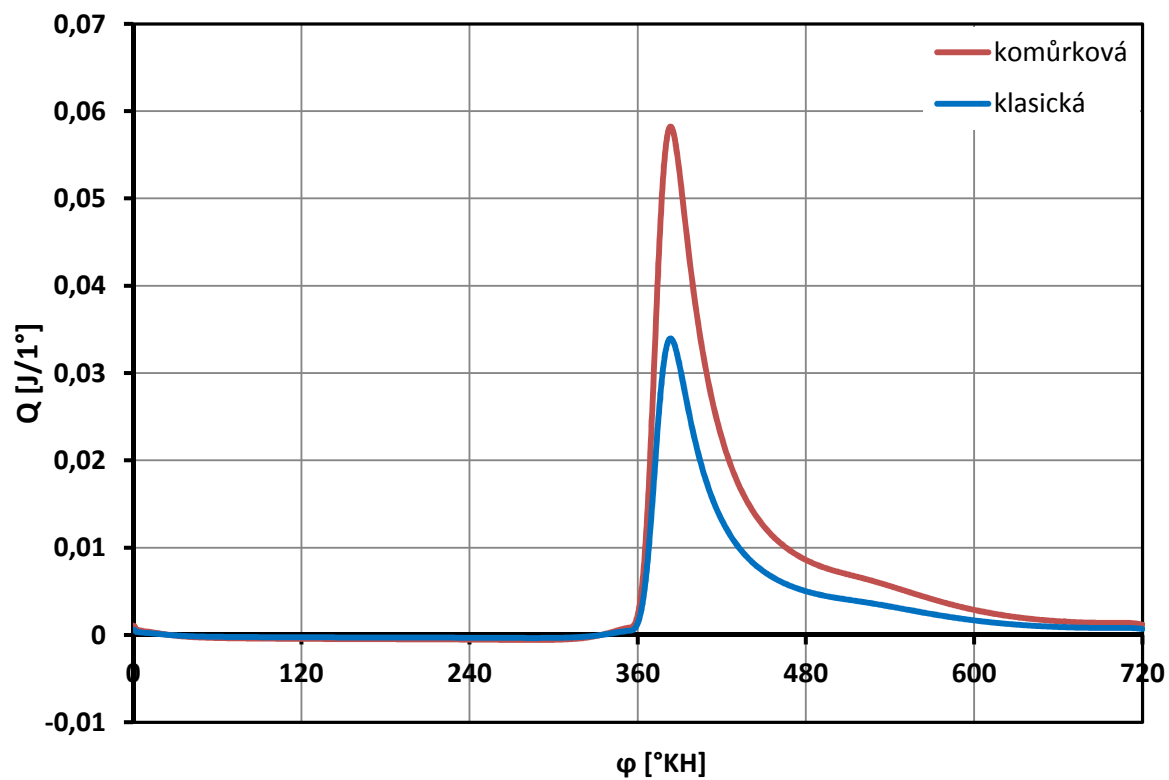


součinitele přestupu tepla jsou např. v 60. letech formulovaný Woschniho a počátkem 90. let formulovaný Bargendeho vztah. Špičkové hodnoty součinitele přestupu tepla podle Bargendeho vztahu jsou proti Eichelbergovu i Woschniho vztahu výrazně vyšší pro oblast spalin. Tj. v partiích u hlavy válců, což zřetelně ukazuje obrázek 30.

Obr. 30 - Porovnání hodnot součinitele přestupu tepla ve válci motoru [8]



Obr. 31 - Přestup tepla do hlavy válců v průběhu pracovního cyklu



Obr. 32 - Přestup tepla do pouzdra svíčky v průběhu pracovního cyklu podle Eichelberga

8.2 Okrajové podmínky pro výpočtový model

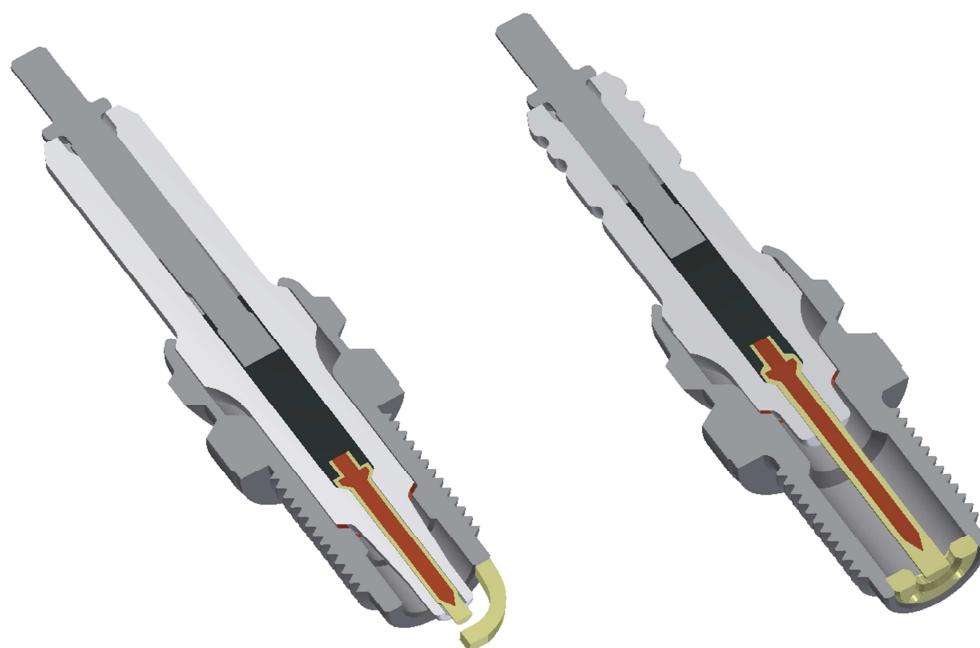
Pro modelování teplotního pole byl použit software Pro/ENGINEER ve verzi Wildfire 4.0 a jeho prostředí pro výpočet pomocí metody konečných prvků Pro/MECHANICA.

Vzhledem k vysokým hodnotám součinitele přestupu tepla podle Bargendeho byl tepelný tok do teplosměnných ploch na hlavě válců a na zapalovací svíčce, určený pomocí Eichelbergova vztahu, zvýšen o 60 %.

Pozn.: program Tlak.xls nepočítá přestupy tepla pomocí Bargendeho vztahu, proto je použita tato jednoduchá korekce pro přiblížení velikosti tepelného toku vyšším hodnotám součinitelů přestupu tepla.

8.2.1 3D Modely komponentů

3D model pouzdra klasické resp. komůrkové zapalovací svíčky byl vytvořen dle poskytnuté výkresové dokumentace KVM a společnosti Brisk. Výkresová dokumentace je uvedena v příloze k diplomové práci. Zbývající součásti jako je izolátor, střední, popřípadě vedlejší elektroda, dno pouzdra, vnitřní a vnější podložky a výplň střední elektrody byl vytvořeny rovněž dle výkresové dokumentace, avšak s minoritními úpravami pro funkčnost výpočtu. Pro zpřesnění simulace byl vymodelován rovněž odporový zátav a svorník zapalovacích svíček. Jednotlivé komponenty svíček byly sestaveny (viz obr 33).



Obr. 33 - Model klasické a komůrkové zapalovací svíčky

Jako model hlavy válců byl použit originální model ze 4 ventilového motoru Škoda 1.2 HTP (EA111.03E), který byl detailně zpracován pro dosažení věrné simulace teplotních poměrů uvnitř motoru.

8.2.2 Materiálové vlastnosti

Na pouzdro, klasické resp. komůrkové zapalovací svíčky byl použit již předdefinovaný materiál „STEEL“ ze softwaru Pro/Mechanika, který se svými vlastnostmi nejvíce podobá použité oceli 11 110. Stejný materiál byl použit i na vnější podložku a svorník zapalovací svíčky.

Materiál střední a vedlejší elektrody klasické a dna pouzdra komůrkové svíčky je vyroben z 99% slitiny niklu. V softwaru byl proto nadefinován nový materiál „NIKL_SLITINA“ s odpovídajícími fyzikálními vlastnostmi.

Pro izolátory obou provedení zapalovací svíčky byl nadefinován materiál „AL2O3“, který svými vlastnostmi odpovídá oxidu hliníku, z něhož jsou v současnosti izolátory vyráběny.

Pro měděnou výplň střední elektrody a vnitřní těsnící podložku svíčky byl použit již předdefinovaný materiál „CU“

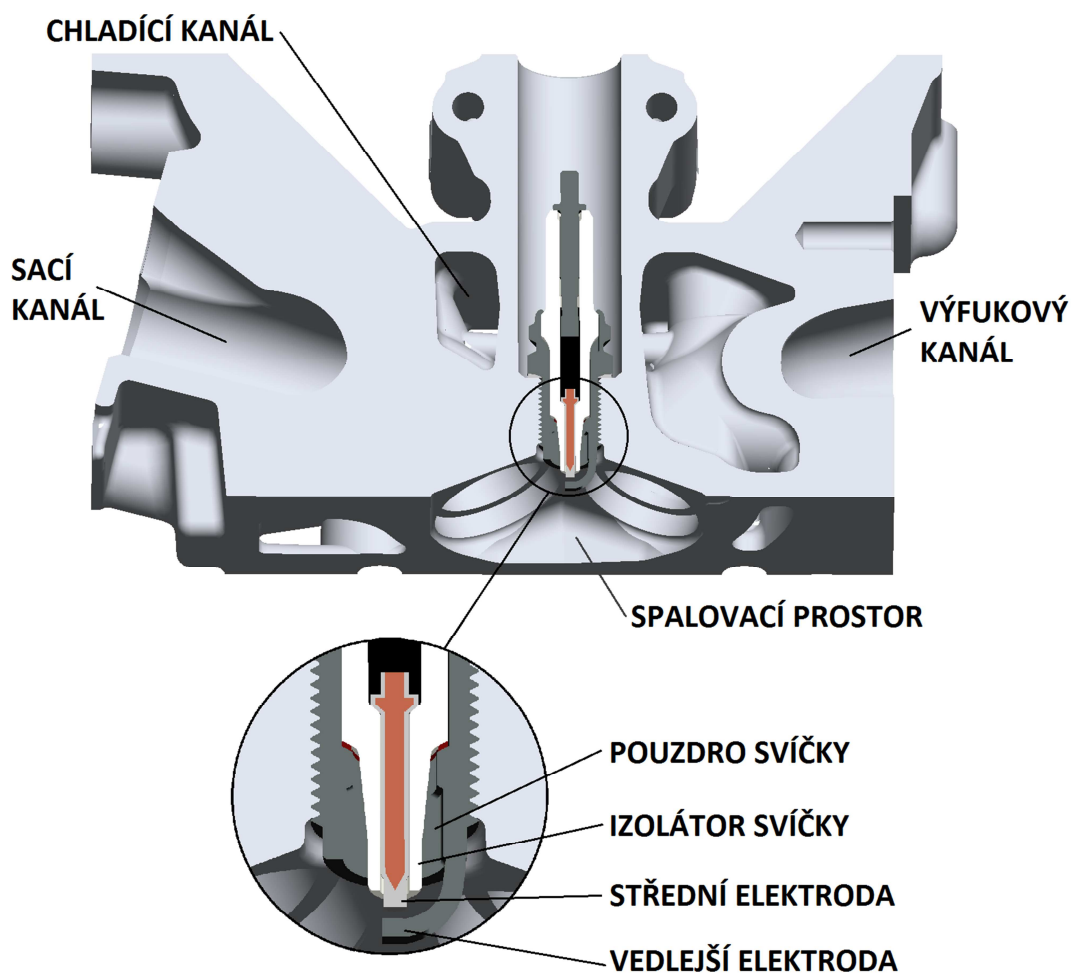
Pro křemíkový odporový zátav byl nadefinován materiál „KREMIK“.

Přesné složení materiálu hlavy válců, a tím i jeho fyzikální vlastnosti výrobce neuvádí, byla použita již předdefinovaná slitina hliníku s označením „AL2014“, která podle předpokladů nejvíce odpovídá skutečnosti.

Materiál	Hustota [kg·m ⁻³]	Tepelná kapacita [J·K ⁻¹]	Tepelná vodivost [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
STEEL	7827	473	43
NIKL_SLITINA	8900	440	75
AL2O3	3690	880	20
CU	8930	377	400
KREMIK	2329	710	150
AL2014	2793	963	155

Tab. 3 - Fyzikální vlastnosti použitých materiálů ve výpočtovém modelu

Pro správný výpočet a získání relevantních výsledků, je důležité správné určení okrajových podmínek výpočtového modelu. Zde je popis okrajových podmínek, které byly na výpočtový model použity (viz obr. 34).



Obr. 34 - Popis ploch pro určení okrajových podmínek

8.2.3 Spalovací prostor

Na celou plochu spalovacího prostoru v hlavě válců byla aplikována okrajová podmínka tepelného zatížení značená jako „HEAT LOAD“. Podle výsledných hodnot tepelného toku do hlavy válců je tato hodnota a $1172 \text{ W pro } 5000 \text{ min}^{-1}$.

8.2.4 Pouzdro zapalovací svíčky

Podobně jako u spalovacího prostoru bylo i na pouzdro zapalovací svíčky aplikováno tepelné zatížení „HEAT LOAD“, avšak v případě pouzdra komůrkové, resp. klasické zapalovací

svíčky bylo aplikováno pouze na plochy, které jsou tzv. kontaktu s plamenem. Z výsledků je hodnota tepelného toku do pouzdra klasické svíčky 73 W resp. 125 W do pouzdra komůrkové svíčky pro otáčky 5000 min^{-1} .

U všech níže uvedených ploch byla aplikována okrajová podmínka přestupu tepla označovaná jako „CONVECTION CONDITION“. Pro správné zadání této okrajové podmínky je nutné znát střední teplotu a hodnotu součinitele přestupu tepla pro dané prostředí. Střední teplota je určena jako rozdíl teploty proudící látky a teploty stěny. Tyto teploty byly určeny dle publikací jiných autorů a konzultace s vedoucím diplomové práce. [10] [11]

8.2.5 Ostatní části zapalovací svíčky

Systém zadávání tepelného zatížení „HEAT LOAD“ je pro zbylé části zapalovací svíčky je totožný jako u jejího pouzdra, tudíž zde nebude rozepisován. Jednotlivé hodnoty lze dohledat ve výsledných hodnotách. U některých zatížení zejména elektrod musela být provedena korekce v souladu s navýšením součinitele přestupu tepla a skutečnosti, že výpočet nezohledňuje přívod tepla z vysokonapěťového elektrického výboje.

8.2.6 Sací kanál

V závislosti na okolním prostředí se teplota nasávané směsi pohybuje okolo 25°C . Teplota stěn sacího kanálu se pohybuje v rozmezí $75 - 95^\circ\text{C}$. Hodnota teplotního spádu byla odhadnuta 60°C .

Určení součinitele přestupu tepla v sacím kanálu je poměrně složitou záležitostí, při které je nutné zohlednit tvar kanálu, jeho průměr, rychlost proudění látky a v neposlední řadě také uvažovat přítomnost kapiček paliva. Hodnota součinitele přestupu tepla v sacím kanálu byla odhadem určena $300 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$.

8.2.7 Výfukový kanál

Teplota spalin zážehového motoru pracujícím se stechiometrickou směsí se pohybuje okolo 900°C . Teplota stěn výfukového kanálu se pohybuje v rozmezí $250 - 300^\circ\text{C}$. Teplotní spád byl odhadnut 650°C .

Stejně jako v sacím, je i ve výfukovém kanálu obtížné určit přesnou hodnotu součinitele přestupu tepla. Hodnota součinitele přestupu tepla byla odhadem určena $500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$.

8.2.8 Chladicí kanál

Teplota chladicí kapaliny je závislá na provozním cyklu motoru a pohybuje se v rozmezí 90 – 100 °C, teplota stěn ve velmi podobném rozmezí. Teplotní spád byl zvolen 85 °C.

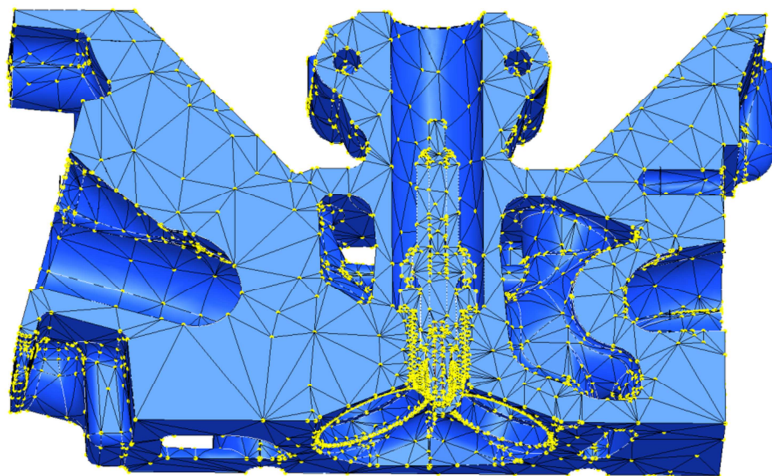
Součinitel přestupu tepla je závislý na stavu chladicí kapaliny a pohybuje se v rozmezí 3000 – 10000 W·m⁻²·K⁻¹. Při překročení bodu varu dosáhnout velmi vysokých hodnot součinitele přestupu tepla až 10 000 W·m⁻²·K⁻¹. Nauvažujeme, že by chladicí kapalina překročila bod varu, z toho důvodu je hodnota součinitele tepelné vodivosti určena 4000 W·m⁻²·K⁻¹.

8.2.9 Geometrické vazby

Model pro výpočet je uvažován jako poloviční model s řezem v ose zapalovací svíčky. Pokud by se jednalo o mechanické namáhání, bylo by nutné zadat okrajovou podmínku symetrie celé sestavy. Pro případ diplomové práce je simulace provedena pouze v režimu „Thermal“, kdy Pro/MECHANICA uvažuje adiabatický děj, kdy nedochází k přestupu tepla do okolí. Pro úplnost zde proto uvádím, že není nutné zadávat geometrické okrajové podmínky.

8.2.10 Sít' prvků

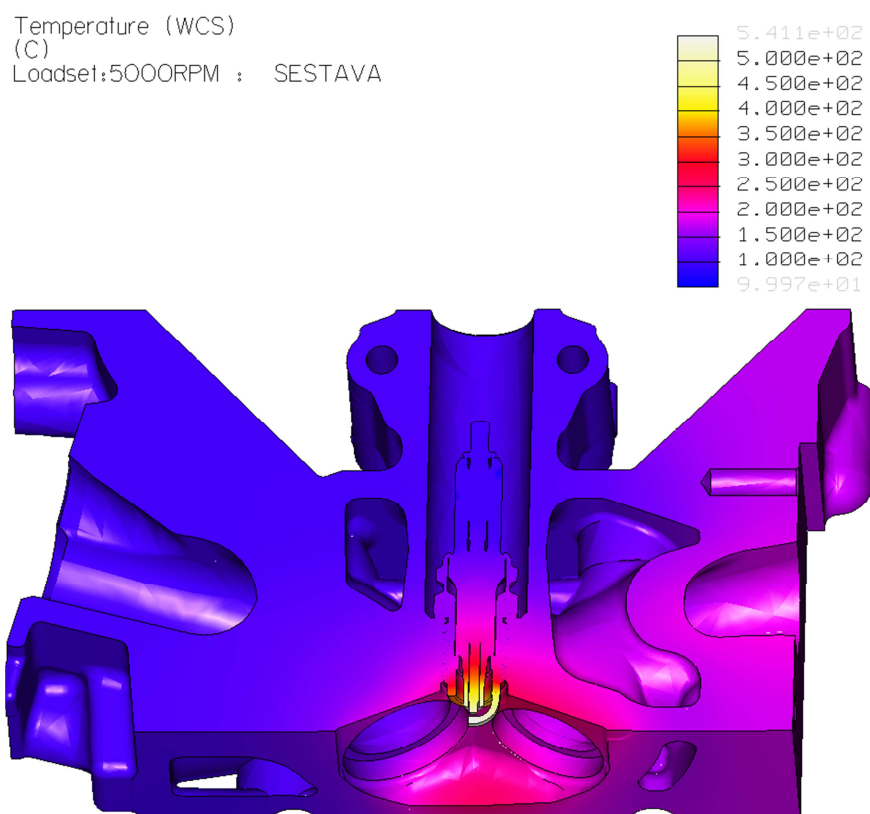
Většina softwarů pro výpočet MKP používá automatické generování sítě prvků, proto bylo i v tomto případě využito automatického generátoru „AutoGEM“, kdy Pro/Mechanica zvolí předdefinovaný typ elementu, jeho rozměr a hustotu sítě. V nejspodnější partii pouzdra klasické, resp. komůrkové svíčky bylo použito zhuštění sítě pro větší přesnost. Maximální velikost elementu zde byla nastavena na 1 mm. Pro sít' byly použity prvky typu „tetra“.



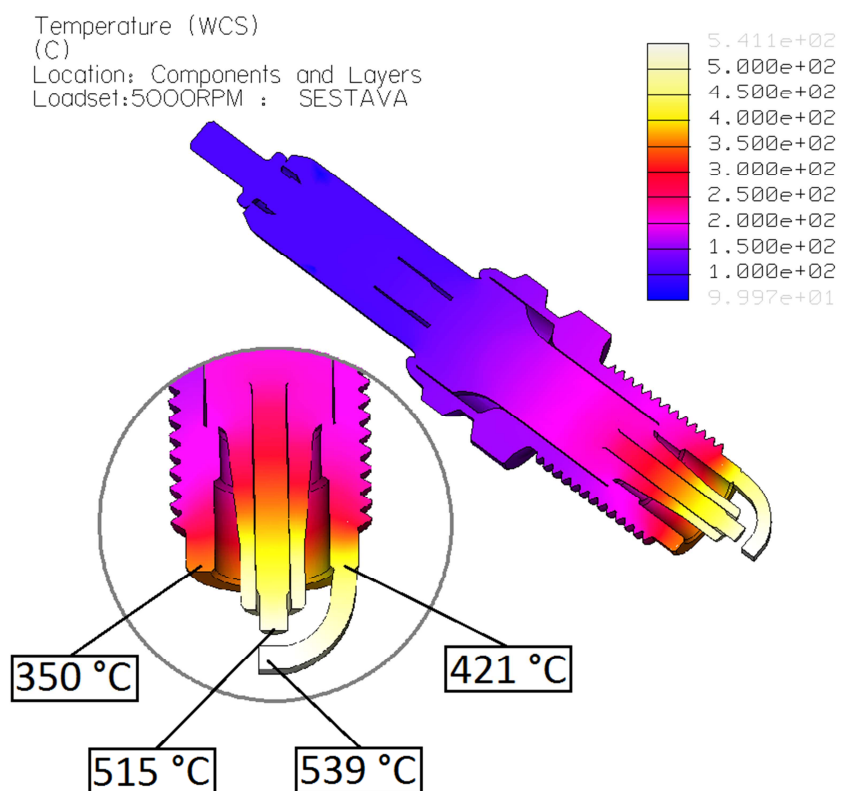
Po automatickém vygenerování byla hustota sítě pouzdra klasické svíčky 34 514 a v případě pouzdra komůrkové svíčky 33 304 prvků.

Obr. 35 - Sít' prvků na výpočtovém modelu

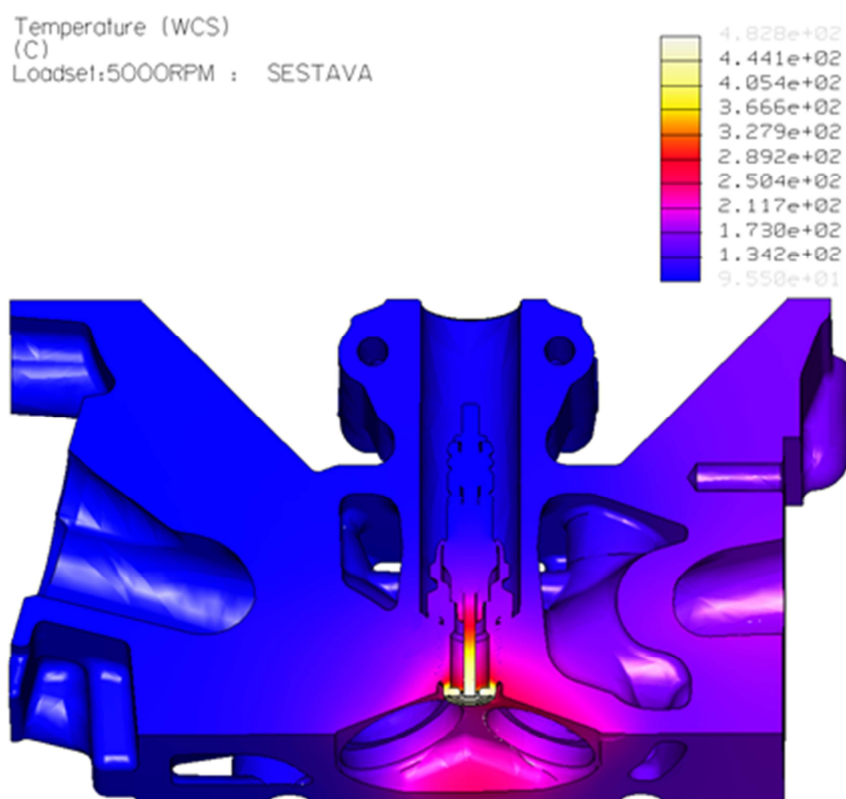
9 Výsledné hodnoty tepelné simulace



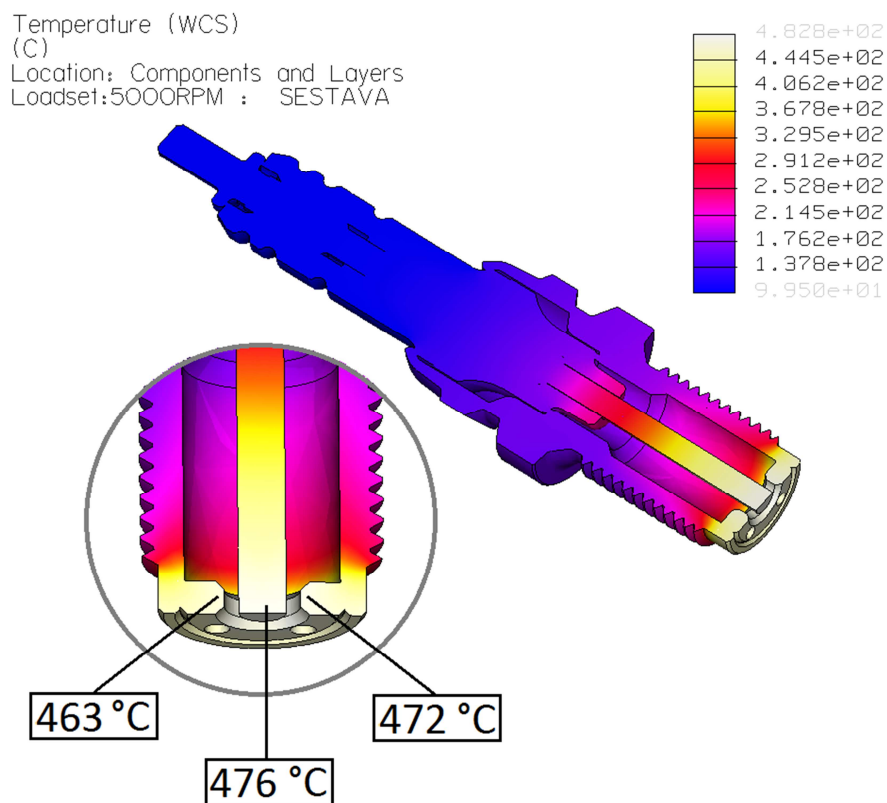
Obr. 36 - Tepelná analýza modelu s pouzdrém klasické svíčky při 5000 min⁻¹



Obr. 37 - Tepelná analýza modelu s pouzdrém klasické svíčky – detail při 5000 min⁻¹



Obr. 38 - Tepelná analýza modelu s pouzdem komůrkové svíčky při 5000 min⁻¹



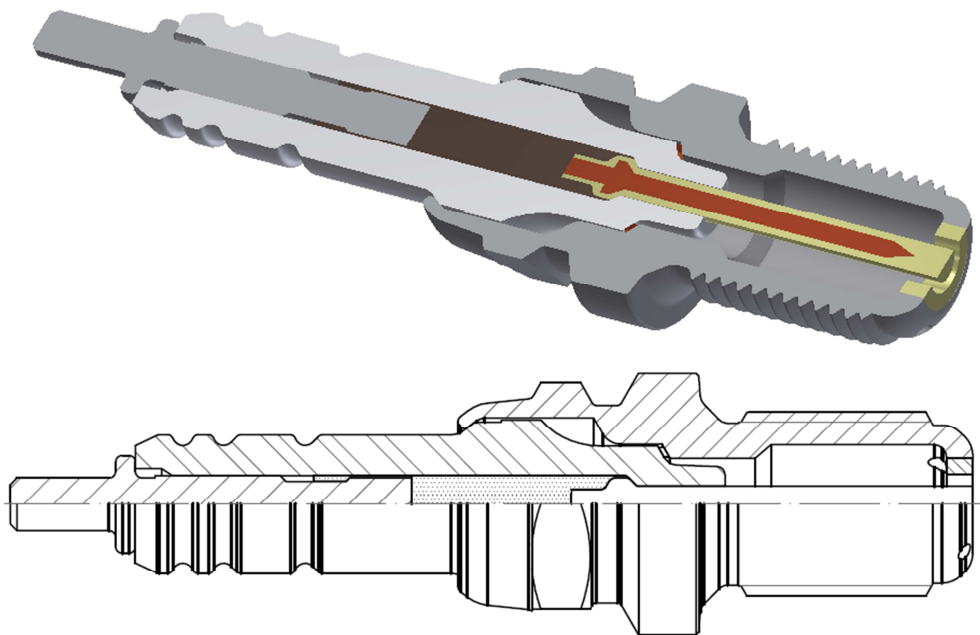
Obr. 39 - Tepelná analýza modelu s pouzdem komůrkové svíčky - detail 5000 min⁻¹

10 Úprava pouzdra komůrkové svíčky

Závěrečná část diplomové práce se zabývá konstrukční úpravou pouzdra komůrkové svíčky, která by měla resultovat v příznivější teplotní namáhání její nejspodnější partie. Při konstruování je potřeba dodržet zejména celkový objem komůrky, zajišťující správnou funkčnost a minimální tloušťku stěn, zejména v oblasti nad závitovou částí.

10.1 Úprava 1

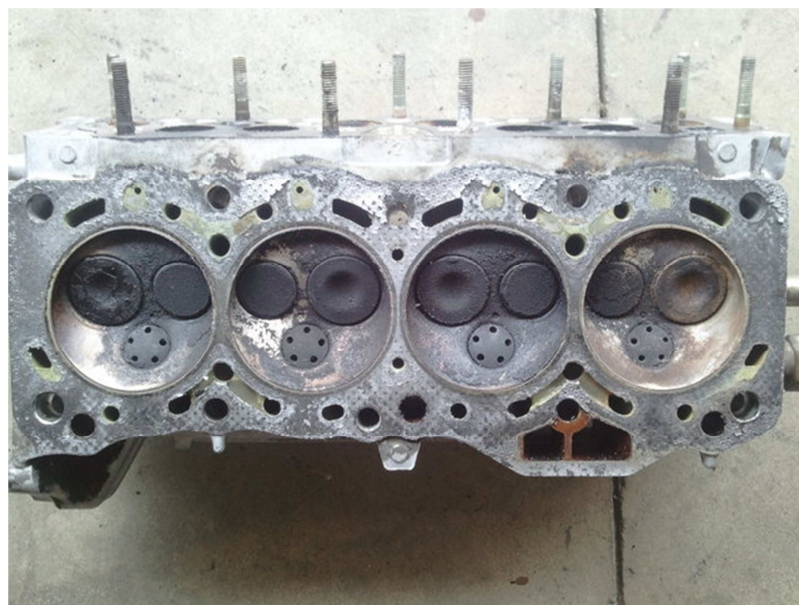
První úprava (viz obr. 40) spodní partie dna komůrkové svíčky spočívá ve zmenšení teplosměnné plochy dna. Dno zhotovené 99 % slitiny niklu zde tvoří jakési pouzdro, které je zalisováno a následně zavalcováno do pouzdra svíčky. Tloušťka dna je 2 mm. V pouzdře jsou po obvodu vyvrtány celkem 4 výšlekové otvůrky o průměru 1.4 mm a středový otvor o průměru 4.5 mm. Dno pouzdra je po obvodě zajištěno proti uvolnění TIG svarem.



Obr. 40 - Komůrková svíčka – úprava 1

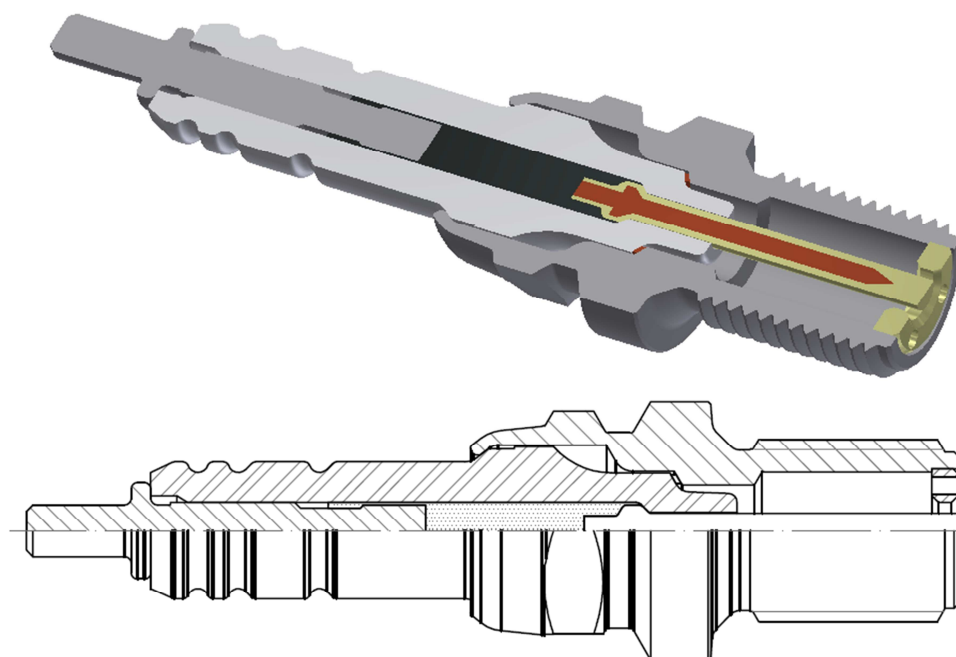
10.2 Úprava 2

Druhá úprava komůrkové svíčky, je inspirovaná podobnou technologií, která byla použita u motorů Honda CVCC. Na obrázku 43 je patrné, že dno komůrky do spalovacího prostoru nevyčnívá, takže je dosaženo velmi dobrého odvodu tepla do hlavy válců. Pouzdro



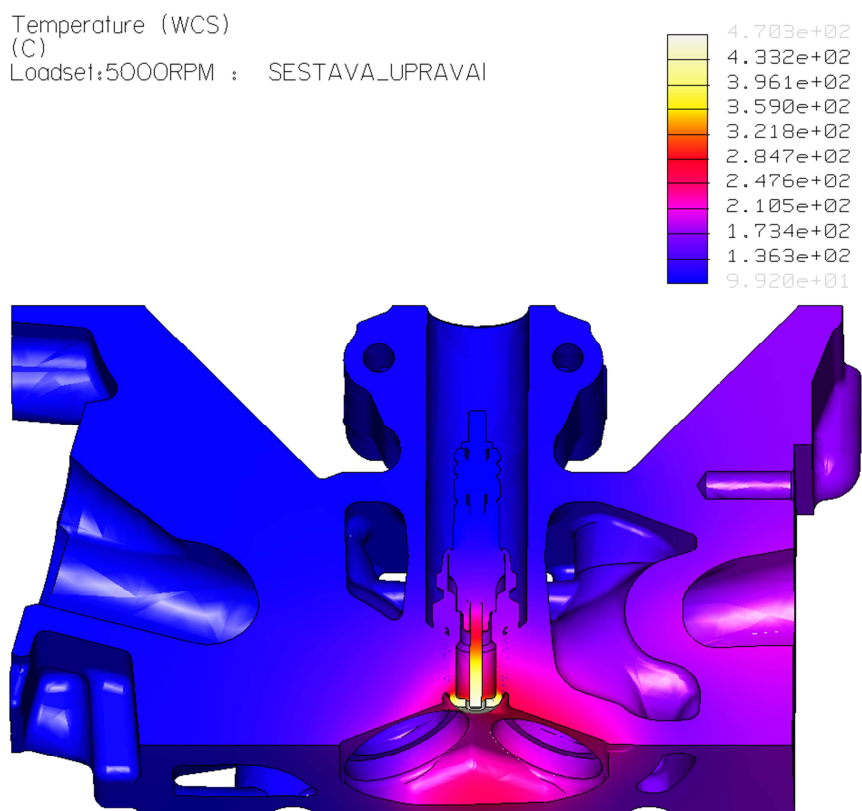
svíčky je při zachování objemu komůrky zkráceno o 2 mm, aby byl přestup tepla z dna komůrky do pouzdra a následně do hlavy motoru co možná nejlepší. Dno komůrky je použito stejné jako u současného provedení komůrkové svíčky KVM, avšak střední elektroda je zkrácena rovněž o 2 mm.

Obr. 41 - Spalovací prostor Honda CVCC [18]

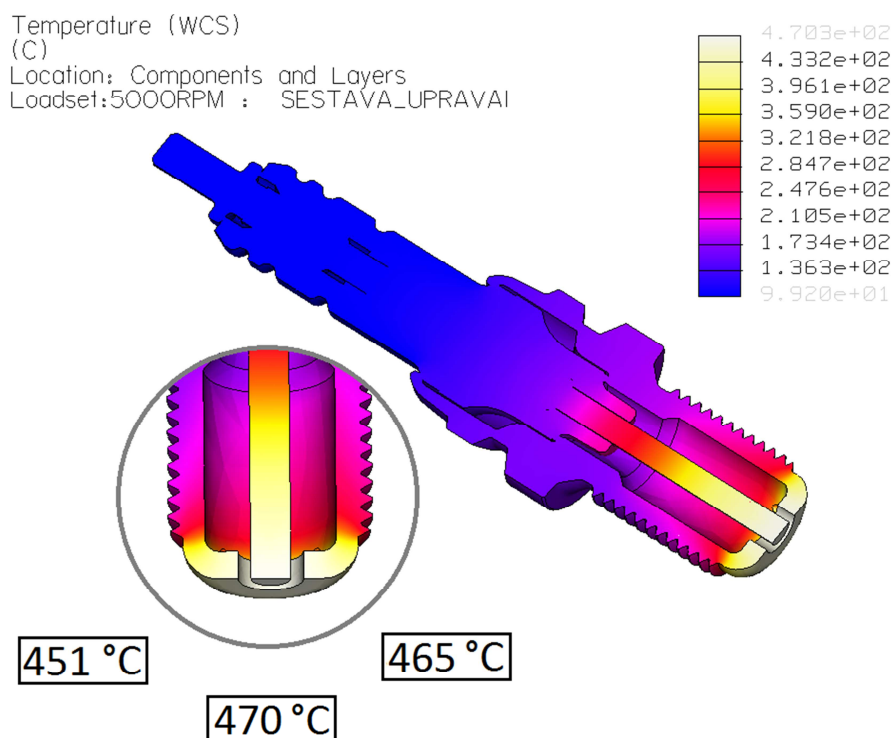


Obr. 42 - Komůrková svíčka - úprava 2

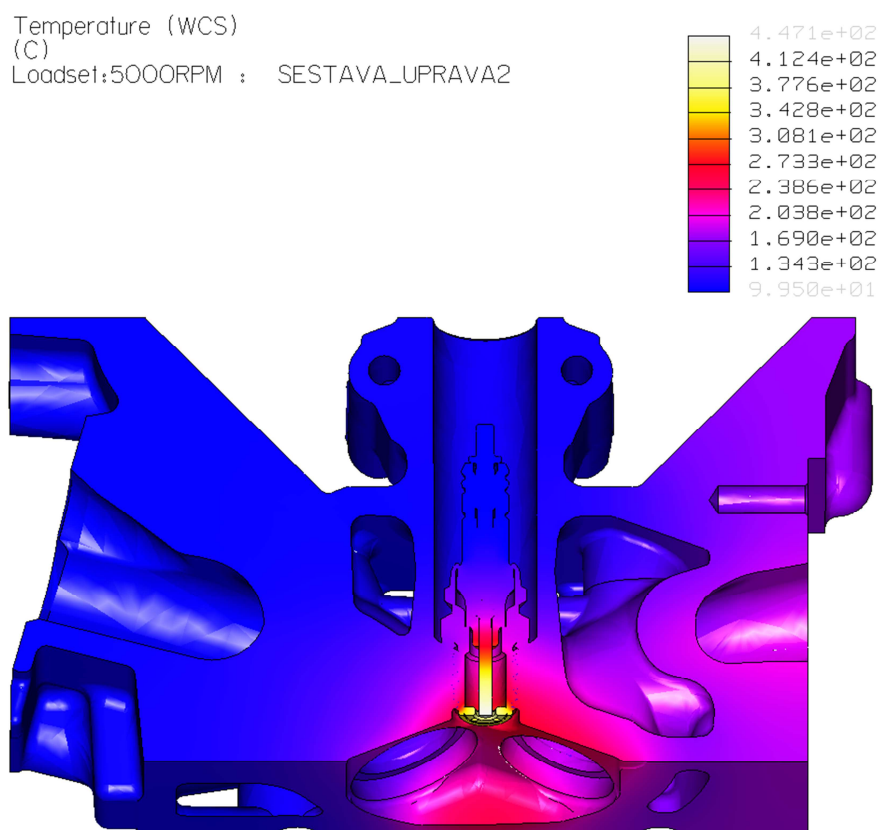
11 Výsledné hodnoty tepelné simulace úprav



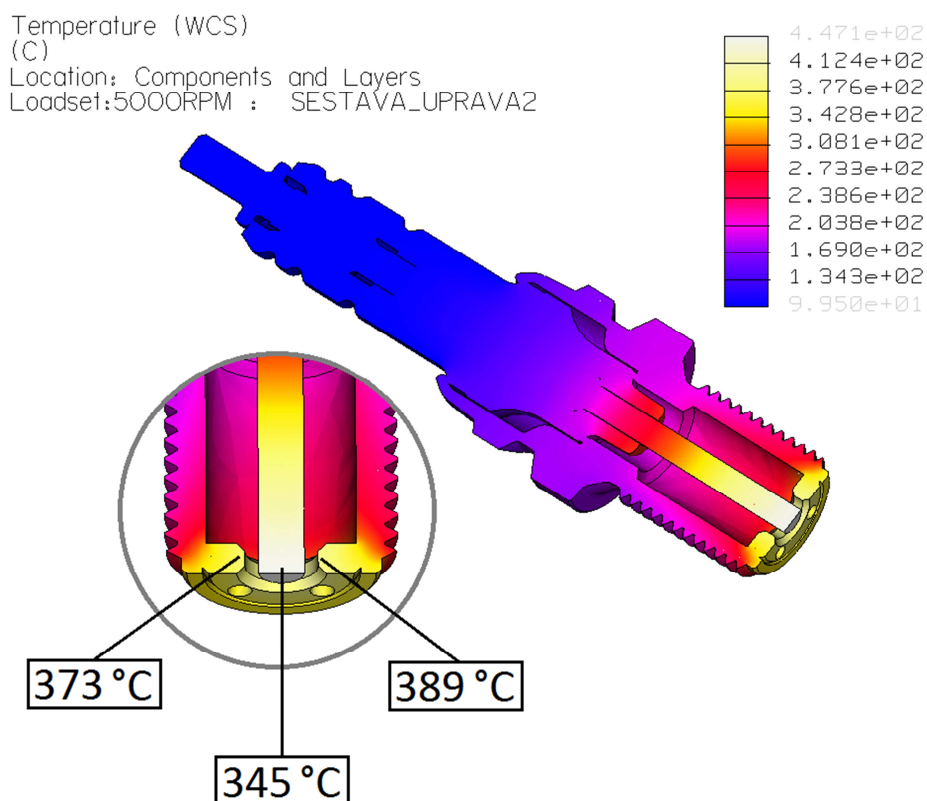
Obr. 43 - Tepelná analýza modelu komůrkové svíčky - úprava 1 při 5000 min⁻¹



Obr. 44 - Tepelná analýza modelu komůrkové svíčky – úprava 1 - detail 5000 min⁻¹



Obr. 45 - Tepelná analýza modelu komůrkové svíčky - úprava 2 při 5000 min⁻¹



Obr. 46 - Tepelná analýza modelu komůrkové svíčky – úprava 2 - detail 5000 min⁻¹

12 Závěr

Diplomová práce nastiňuje trend vývoje technických prostředků pro zvýšení kvality zážehu od použití 2 zapalovacích svíček na válec, přes komůrkový zážeh ve spalovacím motoru až po speciální svíčku s integrovanou komůrkou vyvíjenou na KVM. Vzhledem k podstatě její funkce je taková zapalovací svíčka silně tepelně namáhána a zkušenosti ukazují, že díky nevhodné konstrukci může dojít vlivem tepla k jejímu nenávratnému poškození a v horším případě poškození celého motoru.

Na základě experimentálního ověření teplot v nejspodnější partii klasické zapalovací svíčky bylo v SW PRO/Mechanica vymodelováno a simulováno teplotní pole. Pro jeho výpočet byl použit součinitel přestupu tepla podle Eichelberga, který oproti vztahům dle Woschniho, popř. Bargendeho, udává výrazně nižší špičkové hodnoty pro oblast spalin. Přes určitá zjednodušení výpočtových vztahů pro výpočet přestupu tepla a použitou korekci, tj. zvýšení tepelných toků o 60%, bylo pro klasickou zapalovací svíčku dosaženo velmi dobrých výsledků teplot.

Výsledné teploty klasické zapalovací svíčky vycházejí oproti naměřeným hodnotám mírně vyšší, avšak se nutně nemusí jednat o chybu. Zohledníme-li skutečnost, že byla zapalovací svíčka ochlazována velmi bohatou směsí ($\lambda = 0.77$) v daném provozním režimu motoru, popř. chybou měření způsobenou skutečnou polohou měřicího bodu mikrotermočlásku (vývrt otvoru pro mikrotermočlásek byl do hloubky 0.5 mm nad spodní stěnou pouzdra).

Tepelné namáhání komůrkové zapalovací svíčky vyšlo podle předpokladů značné a maximální teploty v nejspodnější části pouzdra dosahují hodnot téměř 480 °C. Z technických důvodů, ale k jejich experimentálnímu ověření nedošlo.

Diplomová práce rovněž ukazuje možný vývoj tvaru nejspodnější partie komůrkové zapalovací svíčky a nabízí 2 různá řešení. Obě řešení respektují zachování stejného objemu komůrky jako u komůrkové zapalovací svíčky KVM. V prvním případě je použito vložné dno, z 99 % slitiny niklu, při zachování stejné délky izolátoru jako u komůrkové zapalovací svíčky. Druhý případ se zabývá snížením nejspodnější partie komůrkové zapalovací svíčky o 2 mm a zároveň zkrácením střední elektrody rovněž o 2 mm. Tvar dna je zachován stejný jako v případě komůrkové zapalovací svíčky.

Výsledky tepelné simulace úpravy 1 zapalovací svíčky ukazují velmi malé zlepšení tepelného namáhání řádově o 10 °C, nehledě na kritickou část v podobě výšlehových otvůrků zhotovených v pouzdře svíčky.

Úprava 2 inspirovaná technologií Honda CVCC nabízí zajímavé zlepšení maximálních teplot, řádově o 90 °C, díky zkrácení plochy pro odvod tepla z pouzdra do hlavy válců a zmenšení celkové teplosměnné plochy pouzdra svíčky.

Výhodou zde uvedeného výpočtu a následné simulace tepelného pole je jeho univerzálnost, kdy při změně provozního režimu motoru stačí upravit pouze několik vstupních hodnot a okrajové podmínky v SW PRO/Mechanika. Pro ještě přesnější výsledky by bylo vhodné použít simulační programy jako Ricardo WAVE, popř. GT-Power pro téměř věrnou simulaci provozních parametrů spalovací motoru, nebo využití SW ANSYS FLUENT pro simulaci proudění v chladícím, sacím a výfukovém kanálu v hlavy válců.

Použité zdroje

1. KROUPA, Jan. *Nepřímý zážeh směsi ve válci benzinového motoru*. Diplomová práce DP-447, KSD FS TU v Liberci, 2004
2. Beroun, S., Scholz, C.: *Základy teorie vozidel a pístových spalovacích motorů*. KSD TU v Liberci, 2001. ISBN 80-7083-467-6
3. VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 1. vyd. Brno: Prof.Ing.František Vlk, DrSc, 2003, 578 s. ISBN 80-238-8756-4.
4. Beroun, S., Dvořák, V., Blažek, J.: Chamber-type Ignition for an SI Engine. MECCA, 2/2010, ČVUT v Praze, 2010. ISSN 1214-0821.
5. MACEK, Jan a Bohuslav SUK. *Spalovací motory I*. 2. vyd. Praha: ČVUT, 2003, 244 s. ISBN 80-010-2085-1.
6. BEROUN, S. – BLAŽEK, J.: Nepřímý zážeh směsi ve válci vozidlového benzinového motoru. In.: 13th International Symposium Motor Sympo 03. Str. 11-20. ČVUT,VCJB Praha, Brno 2003. ISBN 80-02-01561-4. Projekt LN00B073.
7. HEYWOOD, John B. *Internal combustion engine fundamentals*. New York: McGraw-Hill, Inc.,1988. ISBN 00-702-8637-X.
8. BEROUN, Stanislav a Karel PÁV. *Vybrané statě z vozidlových spalovacích motorů: (doplňková skripta pro magisterský studijní program)*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2013, 149 s. ISBN 978-80-7372-957-8.
9. BEROUN, S.: *Měřící zapalovací svíčky*. Projekt Centrum kompetence Josefa Božka. TU v Liberci, KVM, 2013.
10. ŠPANIEL, CSc., Ing., Miroslav. Diesel engine head thermal and structural stress analysis.
Dostupné z: <http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2004/mecca2004.pdf>
11. NESLÁDEK, Ing., Martin. Výpočty MKP pro kontrolu konstrukčního návrhu hlavy a válce leteckého pístového motoru.

Dostupné z: <http://stc.fs.cvut.cz/History/2011/Sbornik/papers/pdf/1100023-1.pdf>

12. BRISK TÁBOR, a.s. *Zapalovací svíčky, Technický manuál* [online]. [cit. 2013-03-18].

Dostupné z: http://hosting.ibiz.cz/brisk.cz/www/res/files/technical_manual_cz_150dpi.pdf

13. Tech Support - Spark Plugs Overview. *NGK Spark Plugs* [online]. [cit. 2013-03-19].

Dostupné z: http://www.ngksparkplugs.com/tech_support/spark_plugs/p3.asp?mode=nml

14. Odvod tepla a přenos tepla. *NGK* [online]. [cit. 2013-03-19]. Dostupné z:

<http://www.ngk.de/cz/technicke-detaily/zapalovaci-svicky/teplotni-chovani/odvod-tepla-a-prenos-tepla/>

15. Alfa Romeo Twin Spark engine. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-29-02]. Dostupné z:

http://en.wikipedia.org/wiki/Alfa_Romeo_Twin_Spark_engine

16. CVCC means Compound vortex controlled combustion. In: *1stgencivic* [online]. [cit. 2013-05-05]. Dostupné z:

http://www.1stgencivic.com/1stgeneration_civic/models_what_is_cvcc.htm

17. NGK SPARK PLUGS: What is a resistor spark plug?. *NGK*. [online]. [cit. 2014-01-01].

Dostupné z: <http://www.ngk-sparkplugs.jp/english/techinfo/qa/q08/index.html>

18. 32 year old EK1 CVCC junkyard donor motor to resurrect my 1981 Accord. In: [online].

[cit. 2014-01-02]. Dostupné z: http://www.3geez.com/forum/1geez-mechanical/80346-32-year-old-ek1-cvcc-junkyard-donor-motor-resurrect-my-1981-accord-***pics***.html

19. BEROUN S., DITRICH A., DRÁB O.: Teploty na vložených ventilových sedlech motoru EA111.03E. Výzkumná zpráva SM694/2012, KVM FS TU v Liberci, 2012